

เครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ทโฟน



นายพล้ง วัฒนพานิช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

A SMARTPHONE-BASED GAMMA DOSEMETER

Mr. Palang Watanapanich



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ตโฟน
โดย	นายพล้ง วัฒนพานิช
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ เดโช ทองอร่าม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ เดโช ทองอร่าม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. บุญช่วย ศรีธรรมศักดิ์)

พลัง วัฒนพานิช : เครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ทโฟน. (A SMARTPHONE-BASED GAMMA DOSEMETER) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. เตโช ทองอร่าม, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. อรรถพร ภัทรสุมันต์, 65 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ทโฟน เครื่องวัดปริมาณรังสีที่พัฒนาขึ้นมีอัตราการนับรังสี (Count rate) สูงสุดที่ 100 kcps สามารถวัดอัตราปริมาณรังสี (Exposure rate) ได้ในช่วง 0 –300 mR/hr โดยโครงสร้างของเครื่องวัดปริมาณรังสีที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยส่วนสำคัญ 5 ส่วนคือ หัววัดเรืองรังสีชนิดผลึกซีเซียมไอโอไดต์ วงจรขยายสัญญาณพัลส์ วงจรพีคดิเทคเตอร์พร้อมแอมป์แอนด์โฮลด์ วงจรแปลงความสูงสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณดิจิทัลพร้อมระบบสื่อสารบลูทูธ และสมาร์ทโฟน ผลการทดสอบการวัดอัตราปริมาณรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐานซีเซียม-137 พบว่ามีค่าความแตกต่างจากค่ามาตรฐานไม่เกิน $\pm 7\%$ และยังสามารถแสดงสเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาพร้อมทั้งระบุชนิดของไอโซโทปรังสีได้เป็นที่น่าพอใจ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5370304021 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: DOSEMETER / SMARTPHONE / GAMMA SPECTROMETRY

PALANG WATANAPANICH: A SMARTPHONE-BASED GAMMA DOSEMETER.
ADVISOR: DECHO THONG-ARAM, CO-ADVISOR: ASST. PROF. ATTAPORN
PATTARASUMUNT, 65 pp.

This research aims to develop a smartphone based gamma dosimeter. This developed dosimeter has the maximum counting rate of 100 kcps and capable to measure the exposure rate from 0 to 300 mR/hr. The gamma dosimeter compose of five main parts: CsI(Tl) scintillation detector, plus amplifier circuit, peak detector with sample and hold circuit, pulse height to digital converter with bluetooth circuit and smartphone. From the test results of the exposure rate measurements from a standard Cs-137 gamma-ray source compared to the standard value, the different were found to be within $\pm 7\%$ and the energy spectrum of the gamma rays can be displayed and identified satisfactorily.



Department: Nuclear Engineering

Field of Study: Nuclear Technology

Academic Year: 2013

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความอนุเคราะห์จาก อาจารย์เดโช ทองอร่าม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ร่วม และผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ ที่คอยให้คำปรึกษาในทุกๆ ด้าน ชี้แนะถึงแนวทางในการทำงานวิจัย ทั้งยังคอยกระตุ้นเตือนให้เกิดความกระตือรือร้นในการทำงานอยู่เสมอ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบคุณอาจารย์ทั้งสามท่านเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้มอบวิชาความรู้ทางด้านนิวเคลียร์เทคโนโลยีแก่ลูกศิษย์

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญนิวเคลียร์เทคโนโลยี สำหรับวิเคราะห์และทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ วัสดุ อุปกรณ์ และสิ่งอำนวยความสะดวกทั้งหลายสำหรับการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต

ขอขอบคุณ คุณสมชาย เบ้าทอง และ คุณเฉลิมพงษ์ โพธิ์ลี สำหรับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยเป็นกำลังใจให้กันและกัน

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ของข้าพเจ้าเองที่ได้ให้โอกาสในการศึกษา และแรงสนับสนุนในทุกๆ ด้าน และขอขอบคุณ นางสาวปรียากร ธนาภาวราโชติ ที่คอยช่วยเหลือ และให้กำลังใจเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย.....	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เครื่องมือวัดรังสี.....	4
2.1.1 ระบบนับรังสีแบบนับรวม.....	4
2.1.2 ระบบนับรังสีแบบนับแยกพลังงาน.....	5
2.1.3 ระบบนับรังสีแบบโคอินซิเดนซ์.....	7
2.2 หน่วยของการวัดรังสี.....	8
2.3 การเปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดรังสี.....	10
2.3.1 ห้องปฏิบัติการวัดรังสีมาตรฐาน.....	11
2.3.2 เทคนิคการเปรียบเทียบมาตรฐานทุติยภูมิ.....	11
2.4 เครื่องมือวัดด้านความปลอดภัยทางรังสี.....	12
2.4.1 เครื่องวัดอัตราปริมาณรังสี.....	12
2.4.2 เครื่องวัดการเปราะเปื้อนรังสี.....	13
2.5 เครื่องวัดรังสีประเภทระบุชนิดของไอโซโทปรังสี.....	13
2.5.1 โครงสร้างของเครื่องวัดรังสีประเภทระบุชนิดของไอโซโทปรังสี.....	14

2.5.2 หัววัดรังสีชนิดเรืองรังสี	14
2.5.3 ระบบขยายสัญญาณชนิดสเปกโตรสโกปี	15
2.5.4 ระบบนับรังสี	15
2.5.5 ระบบแปลงสัญญาณพัลส์อนาลอกเป็นดิจิทัล	16
2.5.6 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล	17
2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์	19
2.7 ระบบสื่อสารบลูทูธ	22
2.7.1 ประวัติของบลูทูธ	22
2.7.2 หลักการพื้นฐานของบลูทูธ	22
2.7.3 พื้นฐานเทคโนโลยีที่ใช้ในบลูทูธ	24
2.7.4 มาตรฐานของระบบสื่อสารบลูทูธ	26
2.8 สมาร์ทโฟน	27
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	31
3.1 ข้อมูลพื้นฐานของการออกแบบและสร้างเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมา	31
3.1.1 ข้อมูลพื้นฐานสำหรับหัววัดรังสี	31
3.1.2 ข้อมูลพื้นฐานของเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมา	31
3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมา	32
3.2.1 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำ	32
3.2.2 วงจรขยายสัญญาณพัลส์	33
3.2.3 วงจรพิกัดีเทคเตอร์พร้อมแชนเนลแอนด์โฮลด์	35
3.2.4 วงจรแปลงความสูงสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณดิจิทัลพร้อมระบบสื่อสารบลูทูธ	37
3.3 การพัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน	41
3.4 เครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ทโฟน	44
บทที่ 4 การทดสอบสมรรถนะของระบบ	46
4.1 การทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำ	46
4.2 การทดสอบระบบวัดส่วนหน้าพร้อมหัววัดรังสีชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI(Tl)	48
4.3 การทดสอบวงจรขยายสัญญาณพัลส์	49

4.4 การทดสอบวงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแชนเปิ้ลแอนด์โฮลด์	52
4.5 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นในการแปลงความสูงสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข	54
4.6 การเปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดรังสีที่พัฒนาขึ้น	55
4.7 การทดสอบการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา ระบุชนิดของไอโซโทป และการเปรียบเทียบ พลังงาน	57
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	61
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	61
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	62
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	62
รายการอ้างอิง	63
ภาคผนวก.....	64
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	65

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่า Radiation weight factor (W_R).....	10
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ ADC ชนิดเวลาการแปลงผันสัญญาณคงที่แบบต่างๆ.....	17
ตารางที่ 2.3 โครงสร้างชุดข้อมูลของบลูทูธ.....	24
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำขณะที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น.....	47
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตราขยายแบบอินทิกรัล.....	51
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลผลการทดสอบค่าที่ได้จากการตรวจวัดความสูงของสัญญาณอินพุตด้วยวงจรพีคดีเทค.....	53
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นในการแปลงผันสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข.....	55
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลผลการทดสอบอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณเทียบกับอัตราปริมาณรังสีที่วัดได้จากเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้นที่ระยะต่างๆ.....	56
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการวัดรังสีจากต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 และโคบอลต์-60.....	59

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของเครื่องวัดรังสี	4
รูปที่ 2.2 แผนภาพการจัดระบบนับรังสีแบบนับรวม	5
รูปที่ 2.3 แผนภาพการจัดระบบนับรังสีแบบนับแยกพลังงาน	6
รูปที่ 2.4 สเปกตรัมพลังงานแยกเดี่ยวและสเปกตรัมพลังงานย่านกว้าง.....	6
รูปที่ 2.5 ความกว้างของพีคที่บริเวณครึ่งค่านับ (FWHM).....	7
รูปที่ 2.6 แผนภาพการจัดระบบนับรังสีแบบโคอินซิเดนซ์	8
รูปที่ 2.7 สเปกตรัมเวลาของอนุภาคนิวเคลียร์.....	8
รูปที่ 2.8 ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบ	12
รูปที่ 2.9 เครื่องวัดอัตราปริมาณรังสี.....	12
รูปที่ 2.10 เครื่องวัดปริมาณรังสีสะสม.....	13
รูปที่ 2.11 เครื่องวัดการเปราะเปื้อนรังสี.....	13
รูปที่ 2.12 แผนภาพของเครื่องวัดประเภทระบุชนิดของไอโซโทป.....	14
รูปที่ 2.13 ช่วงการปลดปล่อยความยาวคลื่นของฟลักซ์ซิลิลเลเตอร์และอุปกรณ์ไวแสง	15
รูปที่ 2.14 แผนภาพอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง	16
รูปที่ 2.15 แผนภาพการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบ SAR.....	18
รูปที่ 2.16 โครงสร้างเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์	19
รูปที่ 2.17 ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4550.....	21
รูปที่ 2.18 รูปแบบการแลกเปลี่ยนข้อมูล.....	24
รูปที่ 2.19 การส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุโดยเปลี่ยนความถี่ไปมา	25
รูปที่ 2.20 รูปแบบการส่งสัญญาณค้นหาอุปกรณ์	25
รูปที่ 2.21 รูปแบบการสื่อสาร	26
รูปที่ 2.22 โครงสร้างของระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์	29
รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของหัววัดรังสีและวงจรขยายส่วนหน้า	31
รูปที่ 3.2 แผนภาพการทำงานของเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น.....	32
รูปที่ 3.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น	33
รูปที่ 3.4 แผนภาพการทำงานของวงจรขยายสัญญาณพัลส์	34
รูปที่ 3.5 แผ่นวงจรขยายสัญญาณพัลส์	34
รูปที่ 3.6 แผนภาพวงจรขยายสัญญาณพัลส์	35
รูปที่ 3.7 แผนภาพฟังก์ชันการทำงานของไอซี PKD01EP.....	36

รูปที่ 3.8 แผนภาพฟังก์ชันการทำงานของไอซี HFE4538 36

รูปที่ 3.9 วงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแฮมเปิลแอนด์โฮลด์ 36

รูปที่ 3.10 แผนภาพแสดงเวลาของสัญญาณต่างๆ ในวงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแฮมเปิลแอนด์โฮลด์ . 37

รูปที่ 3.11 แผ่นวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ 38

รูปที่ 3.12 แผนภาพวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ 38

รูปที่ 3.13 โมดูลระบบสื่อสารบลูทูธ 39

รูปที่ 3.14 แผนผังการทำงานของโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ 40

รูปที่ 3.15 แอปพลิเคชัน Gamma spectrometer (GSM)..... 41

รูปที่ 3.16 แผนผังการทำงานของแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น 43

รูปที่ 3.17 แผนภาพการทำงานของเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ตโฟน 44

รูปที่ 3.18 แผ่นวงจรภายในเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น 44

รูปที่ 3.19 เครื่องวัดปริมาณรังสีและอุปกรณ์ประกอบที่ทำงานร่วมกัน 45

รูปที่ 4.1 การจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าคัทดาวน์ 46

รูปที่ 4.2 สัญญาณแรงดันกระแสเพื่อขณะไม่มีโหลด 47

รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงดันกระแสเพื่อขณะจ่ายโหลดสูงสุด 48

รูปที่ 4.4 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบระบบวัดส่วนหน้าพร้อมหัววัดรังสี ชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI(Tl)..... 48

รูปที่ 4.5 สัญญาณพัลส์ทางด้านเอาต์พุตจากวงจรขยายส่วนหน้าของหัววัดรังสี ชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI(Tl) 49

รูปที่ 4.6 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบสมรรถนะของวงจรขยายสัญญาณพัลส์ 49

รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบอัตราการขยายสูงสุด 50

รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบที่อัตราการขยาย 100 เท่า 51

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นของอัตราขยายแบบอินทิกรัล 51

รูปที่ 4.10 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบสมรรถนะของวงจรพีคดีเทค 52

รูปที่ 4.11 รูปสัญญาณที่ได้จากวงจรพีคดีเทคที่ขนาดสัญญาณอินพุต 2 โวลต์ 53

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสัญญาณอินพุตและขนาดสัญญาณที่ตรวจวัดได้ 54

รูปที่ 4.13 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบความเป็นเชิงเส้น ในการแปลงความสัญญาณพัลส์ เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข 54

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและช่องวิเคราะห์พลังงาน 55

รูปที่ 4.15 แผนภาพการจัดอุปกรณ์การปรับเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดรังสีที่พัฒนาขึ้น 56

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบ	57
รูปที่ 4.17 แผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดสอบการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา ระบุชนิด ของไอโซโทป และการเปรียบเทียบพลังงาน.....	57
รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบพลังงานจากต้นกำเนิดรังสีซีซีเอ็ม-137.....	58
รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบพลังงานจากต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60	58
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีและช่องวิเคราะห์พลังงาน	59
รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบการระบุชนิดของไอโซโทปรังสีซีซีเอ็ม-137.....	60



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รังสีมีประโยชน์ต่อมวลมนุษยชนทั้งการนำไปใช้งานด้านการแพทย์ การอุตสาหกรรม การเกษตร การตรวจสอบด้านความมั่นคงและงานด้านอื่นๆ ในขณะที่เดียวกันรังสีก็มีอันตรายต่อมนุษย์เช่นกัน ดังนั้นการปฏิบัติงานด้านรังสีจึงต้องมีการควบคุมให้ผู้ปฏิบัติงานปลอดภัยจากการได้รับรังสี โดยจัดการป้องกันให้ผู้ปฏิบัติงานและเพื่อนร่วมงานมีโอกาสได้รับรังสีน้อยที่สุดตามหลักการ ALARA (As Low As Reasonably Achievable) รวมถึงกำกับดูแลระดับปริมาณรังสีบริเวณปฏิบัติงานให้เป็นไปตามเกณฑ์ความปลอดภัยมาตรฐานทางรังสี [1] อย่างไรก็ตาม การที่ผู้ปฏิบัติงานจะทราบค่าปริมาณรังสีบริเวณพื้นที่ทำงานจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการตรวจวัดรังสีของเครื่องวัดรังสี โดยเฉพาะเครื่องวัดปริมาณรังสีที่สามารถแสดงผลค่าวัดปริมาณรังสีได้ทันที (Active monitoring) แต่เนื่องจากเครื่องวัดปริมาณรังสีดังกล่าวเป็นเครื่องมือที่ผลิตขึ้นใช้เฉพาะกลุ่มผู้ปฏิบัติงานทางรังสี จึงมีราคาค่อนข้างแพง ทำให้เป็นเรื่องยากที่บุคคลทั่วไปจะมีไว้ใช้งาน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาเครื่องวัดปริมาณรังสีแบบประหยัด โดยออกแบบระบบวัดรังสีแกมมาและระบบวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาที่มีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา ให้ทำงานร่วมกับสมาร์ตโฟน (Smartphone) ที่ใช้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (Android) มีฟังก์ชันวัดอัตราปริมาณรังสีและระบุชนิดของไอโซโทปรังสี สามารถนำติดตัวไปวัดปริมาณรังสีตามสถานที่ต่างๆ ได้สะดวกพร้อมพัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน ให้สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ง่ายผ่านทางระบบสื่อสารบลูทูธ (Bluetooth)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานบนสมาร์ตโฟน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่สามารถวัดปริมาณรังสี อัตราปริมาณรังสี และระบุชนิดของไอโซโทปได้

2. ออกแบบและสร้างส่วนเชื่อมโยงสัญญาณกับสมาร์ตโฟน พร้อมโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบและการแสดงผล

3. ทดสอบความถูกต้องในการวัดปริมาณรังสี และการระบุชนิดของไอโซโทป

1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. ออกแบบและสร้างส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาได้แก่ วงจรแหล่งจ่าย ไฟฟ้า วงจรขยายสัญญาณพัลส์ วงจรวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์แบบหลายช่อง และวงจรสร้างสัญญาณลอจิกควบคุม

3. ออกแบบและสร้างส่วนเชื่อมโยงสัญญาณกับสมาร์ทโฟน พร้อมทั้งโปรแกรมวัดปริมาณรังสีควบคุมการทำงานของระบบ การระบุชนิดของไอโซโทปและการแสดงผล
4. ทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น
5. สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาแบบประหยัดที่ทำงานร่วมกับสมาร์ทโฟน และใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาสำหรับงานด้านความปลอดภัยทางรังสีและสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปี 2536 วิรุฬห์ มังคละวิรัช และ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [2] ทำวิจัยเรื่องอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง โดยออกแบบระบบแปลงสัญญาณพัลส์อนาล็อกเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขแบบวิลคินสัน (Wilkinson) ทำงานด้วยความถี่ฐานเวลา 50 MHz มีความละเอียดในการวิเคราะห์ 1024 ช่องวัดและมีความจุต่อช่องวัดเท่ากับ $10^{16}-1$ จำนวนนับ พร้อมทั้งพัฒนาโปรแกรมควบคุมการส่งข้อมูลดิจิทัลจากระบบแปลงสัญญาณผ่านช่องขยายการทำงาน (Slot) ขนาด 8 บิต บนไมโครคอมพิวเตอร์

2. ปี พ.ศ. 2543 João M. Cardoso, Vitor Amorim, Rui Bastos, Rui Madeira, J. Basilio Simões และ Carlos M. B. A. Correia [3] ทำการวิจัยเรื่อง A Very Low-Cost Portable Multichannel Analyzer งานวิจัยนี้ได้พัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่องแบบพกพาบนพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ มีความละเอียดช่องวิเคราะห์ 1024 ช่อง อัตราการรับสัญญาณประมาณ 1000 cps และมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่า 100 มิลลิวัตต์ โดยใช้แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน หน่วยความจำสามารถเก็บข้อมูลการวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาได้หลายชั่วโมง อุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่องที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย วงจรขยายส่วนหน้า วงจรขยายและปรับแต่งรูปสัญญาณ วงจรพิกัดเทคเตอร์ และวงจรสร้างสัญญาณลอจิกควบคุม ในการแสดงผลสเปกตรัมของรังสีใช้จอแสดงผลแบบดอทเมทริกซ์ สามารถบันทึกข้อมูลที่ได้จากการวัดรังสีด้วยการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตยูเอสบี อินฟาเรด หรือ RS-232 ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อแบบอนุกรม นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมต่อกับจีพีเอสได้

3. ปี พ.ศ. 2547 อภิรักษ์ ลอยแก้ว [4] ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาบนพ็อกเก็ตพีซี งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาบนพ็อกเก็ตพีซี สำหรับวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาที่ได้จากการวัดโดยใช้หัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง โดยสามารถรับข้อมูลสเปกตรัมจากเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่องของ Canberra Series 35 Plus และ 10 Plus ได้โดยตรง หรืออ่านข้อมูลสเปกตรัมที่บันทึกไว้ในหน่วยความจำบนพ็อกเก็ตพีซี หรือการ์ดความจำแล้วแสดงสเปกตรัมบนหน้าจอของพ็อกเก็ตพีซี โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถหาจุดกึ่งกลางพีก หาจำนวนนับรวมบนพื้นที่ใต้พีก หาพื้นที่สุทธิใต้พีก ประมาณค่าความกว้าง ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงพีก หาพลังงานของพีก รวมทั้งการเปรียบเทียบพลังงานและการระบุชนิดของไอโซโทปได้

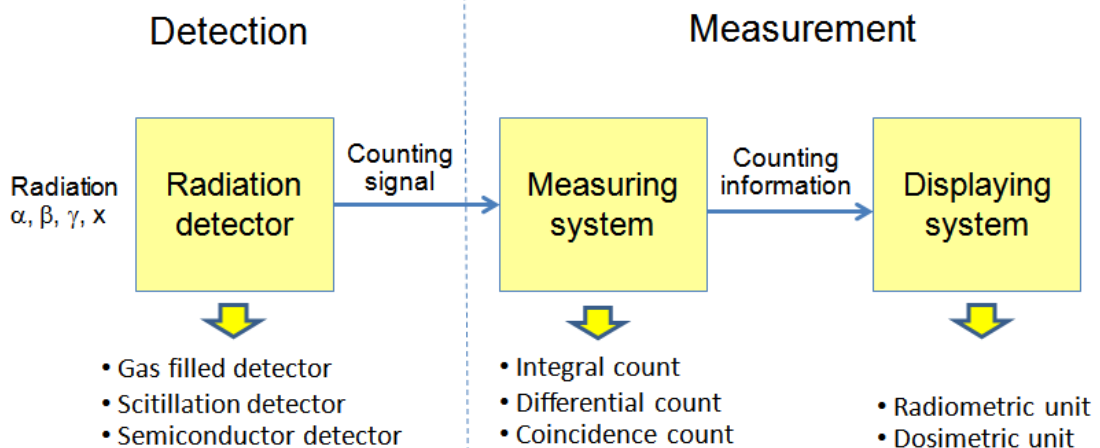
4 .ปี พ.ศ. 2551 กมลทิพย์ พลอยกระจ่าง [5] ทำการวิจัยเรื่อง เครื่องวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาที่ทำงานบนพ็อกเก็ตพีซีโดยใช้ไปป์ไลน์เอดีซี งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีแกมมา ชนิดเวลาการแปลงผันสัญญาณคงที่ขนาด 4096 ช่องวิเคราะห์ ทำงานร่วมกับพ็อกเก็ตพีซี เพื่อให้มีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา และมีอัตราสูญเสียกำลังไฟฟ้าต่ำ โดยนำเอาเทคโนโลยี FPGA ไปป์ไลน์เอดีซีขนาด 12 บิต และไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิตมาใช้ในส่วนของการทำงานแปลงความสูงสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์เป็นสัญญาณดิจิทัล มีส่วนเชื่อมโยงสัญญาณ และควบคุมการทำงานของระบบผ่านทางพ็อกเก็ตพีซี สำหรับวงจรขยายสัญญาณพัลส์สามารถปรับอัตราการขยายสัญญาณต่อเนื่องได้ สูงสุด 100 เท่า

5. ปี พ.ศ. 2555 Y. Goncharenko [6] ได้เสนอบทความเรื่อง Gamma Sapiens intellectual gamma radiation detector บทความนี้ได้กล่าวถึงงานวิจัยและพัฒนาระบบวัดรังสีแกมมาที่ทำงานบนสมาร์ตโฟนที่ใช้ระบบปฏิบัติการของ Android ซึ่งมีการผลิตออกจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยระบบวัดรังสีแกมมาใช้หัววัดไกเกอร์ส่งสัญญาณผ่านระบบสื่อสารบลูทูธในระยะไม่เกิน 5 เมตร ออกแบบให้สามารถวัดได้ทั้งปริมาณรังสีสะสมและอัตราปริมาณรังสี ในช่วง 0.001- 9999 mSv และ 0.1-5000 $\mu\text{Sv/h}$ ตามลำดับ มีความคลาดเคลื่อน $\pm 25\%$ จากผลการตอบสนองของพลังงานที่แตกต่างกัน (Energy dependence) ในช่วง 0.05-1.25 MeV

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องมือวัดรังสี

เครื่องมือวัดรังสีโดยทั่วไปมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนทำงานร่วมกันดังแสดงองค์ประกอบของเครื่องวัดรังสีในรูปที่ 2.1 ได้แก่ ส่วนการตรวจวัดรังสี (Detection) และส่วนการวัดรังสี (Measurement) [7] ในส่วนการตรวจวัดรังสีนั้นเป็นส่วนของหัววัดรังสี ซึ่งทำหน้าที่สร้างกระบวนการแปลงผันพลังงานจลน์ของรังสีที่ถ่ายโอนในตัวกลางให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า (Counting signal) สำหรับส่วนการวัดรังสีจะทำหน้าที่นำผลการตรวจวัดไปจำแนกหรือวิเคราะห์ผลการวัดรังสีด้วยเทคนิคของระบบวัดแบบต่างๆ สร้างเป็นข้อมูลการวัด (Counting information) ให้อยู่ในรูปแบบที่ต้องการ เช่น การวัดปริมาณรังสี การวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น เพื่อส่งไปแสดงผลในหน่วยวัดรังสีมาตรฐาน ได้แก่ หน่วยวัดการแผ่รังสี (Radiometric unit) และหน่วยวัดปริมาณรังสี (Dosimetric unit) [8]



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของเครื่องวัดรังสี

กระบวนการในการวัดรังสีจากหัววัดรังสีที่ทำงานในโหมดพัลส์ (Pulse mode) [7] มีลักษณะเป็นการนับรังสีที่ถูกแปลงเป็นสัญญาณพัลส์ (Count) ต่อเวลา ทำให้ผลการวัดรังสีเบื้องต้นมีหน่วยเป็น cps หรือ cpm ดังนั้นระบบวัดรังสี (Measuring system) ในลักษณะนับพัลส์จึงเรียกว่าระบบนับรังสี (Counting system) ซึ่งเทคนิคของระบบนับรังสีสำหรับจัดการข้อมูลวัดในรูปแบบของการนับรังสีเฉพาะงาน แบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามความต้องการข้อมูลวัดรังสี มีดังนี้

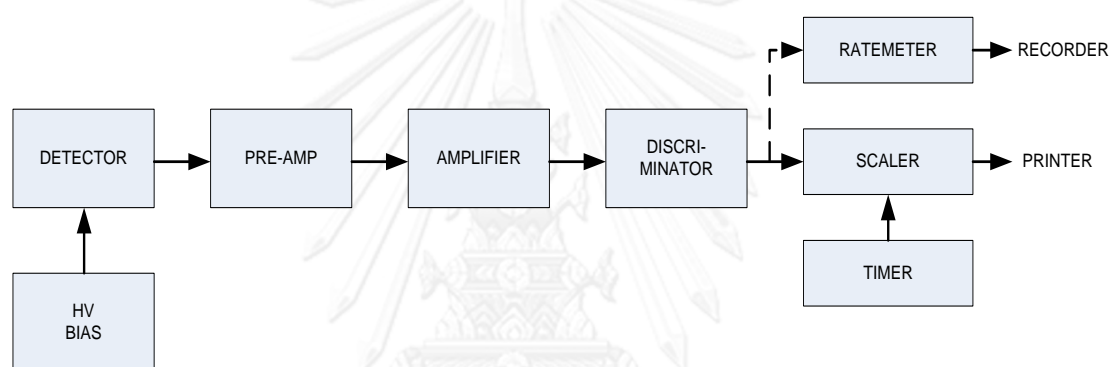
2.1.1 ระบบนับรังสีแบบนับรวม (Integral counting system) [7]

ระบบนับรังสีแบบนับรวม มีรูปแบบการจัดอุปกรณ์วัดดังแผนภาพในรูปที่ 2.2 เป็นระบบนับรังสีที่นับสัญญาณพัลส์ของทุกพลังงานซึ่งตรวจวัดได้ กล่าวคือ เป็นการนับรังสีที่ไม่มีการแยกนับเฉพาะพลังงาน เช่น การวัดความแรงรังสี (Activity) การวัดความเข้มรังสี (Intensity) ซึ่งแสดงผล

เป็นค่าของจำนวนนับต่อเวลา เช่น จำนวนนับต่อนาที (Counts per minute, cpm) หรือจำนวนนับต่อวินาที (Counts per second, cps) เป็นต้น อย่างไรก็ตามระบบนับรังสีจะตอบสนองการวัดรังสีเฉพาะส่วนที่ตกกระทบหัววัดรังสีเท่านั้น ในขณะที่ต้นกำเนิดรังสีแผ่รังสีออกกรอบตัว (4π) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบถึงคุณสมบัติของระบบในแง่ของประสิทธิภาพการนับรังสี (Counting efficiency, η) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1

$$\eta = \frac{cps}{dps} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

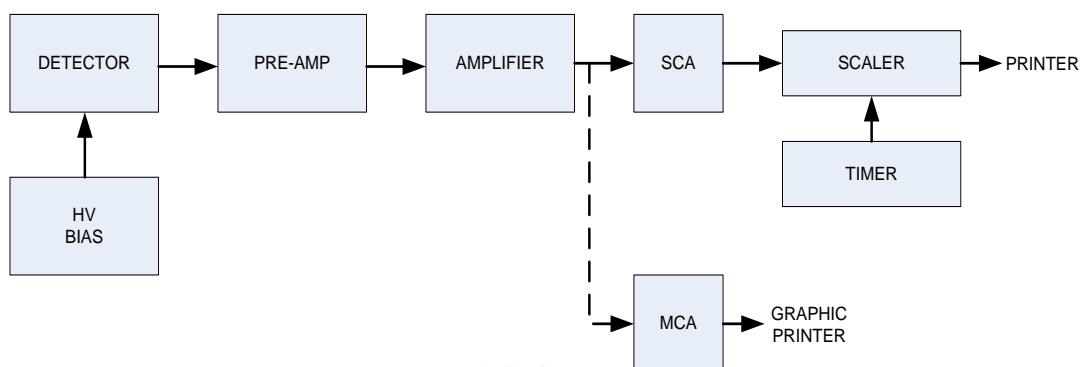
เมื่อ dps คือ อัตราการสลายตัวต่อวินาทีของต้นกำเนิดรังสี
cps คือ อัตรานับรังสีต่อวินาทีที่อ่านค่าได้จากระบบนับรังสี



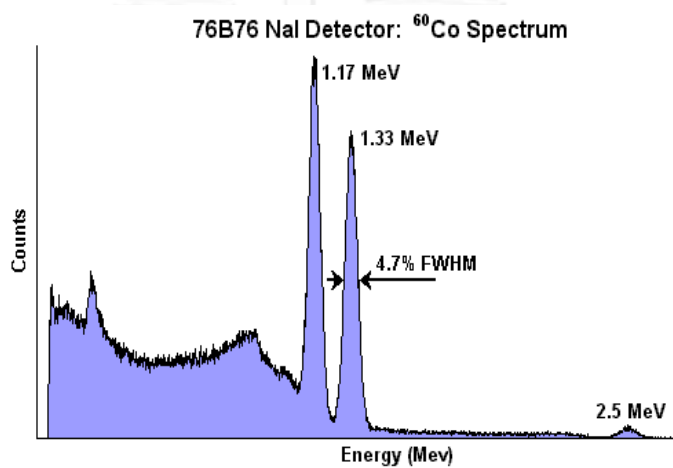
รูปที่ 2.2 แผนภาพการจักระบบนับรังสีแบบนับรวม

2.1.2 ระบบนับรังสีแบบนับแยกพลังงาน (Differential counting system) [7]

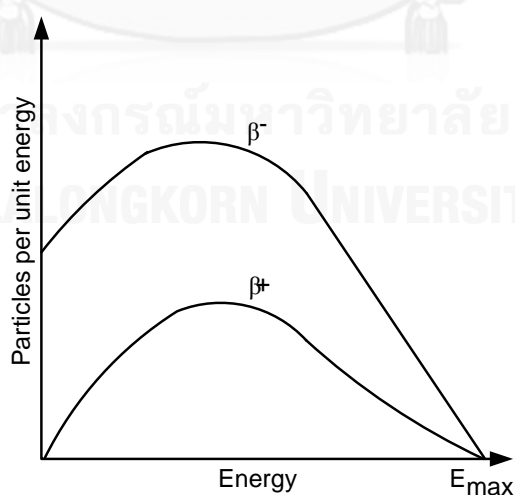
ระบบนับรังสีแบบนับแยกพลังงาน มีรูปแบบการจัดอุปกรณ์วัดดังแผนภาพในรูปที่ 2.3 เป็นระบบนับรังสีสำหรับวัดรังสีแบบแยกนับเฉพาะพลังงานซึ่งจะแสดงผลในรูปของสเปกตรัมพลังงาน (Energy spectrum) เช่น ระบบวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา (γ -spectrometer) และระบบวิเคราะห์รังสีแอลฟา (α -spectrometer) เป็นต้น สำหรับระบบวัดรังสีแบบนับแยกพลังงานนี้ หัววัดรังสีต้องสามารถแจกแจงพลังงานได้ สัญญาณพัลส์จากอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่มีขนาดความสูงเป็นสัดส่วนกับพลังงานจะถูกส่งต่อให้กับอุปกรณ์วิเคราะห์ความสูงของพัลส์ (Pulse Height Analyzer, PHA) ซึ่งอาจเป็นอุปกรณ์วิเคราะห์แบบช่องเดี่ยว (Single Channel Analyzer) หรืออุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer, MCA) ทำการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์และแยกนับปริมาณรังสีเฉพาะพลังงาน ในลักษณะการกระจายพลังงานที่ตรวจพบ (Energy distribution) ซึ่งธรรมชาติของการปลดปล่อยพลังงานจะมีทั้งการกระจายเชิงสเปกตรัมเดี่ยว (Discrete spectrum) และเชิงสเปกตรัมกว้าง (Broad spectrum) ดังในรูปที่ 2.4 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 แผนภาพการจัดระบบนับรังสีแบบนับแยกพลังงาน



(ก) สเปกตรัมพลังงานแยกเดี่ยว (Discrete spectrum)

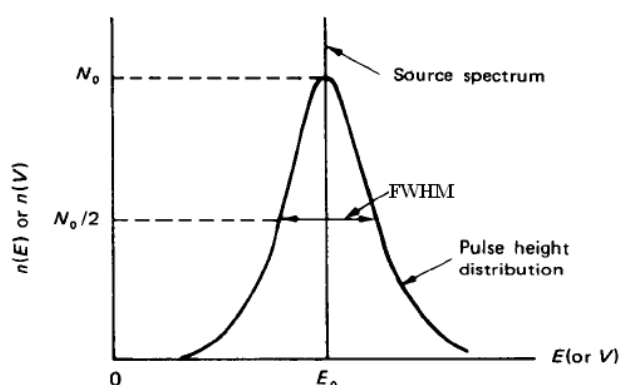


(ข) สเปกตรัมพลังงานย่านกว้าง (Broad spectrum)

รูปที่ 2.4 สเปกตรัมพลังงานแยกเดี่ยวและสเปกตรัมพลังงานย่านกว้าง

ในกรณีของสเปกตรัมพลังงานเดี่ยว การวัดรังสีจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติของระบบในแง่ความสามารถในการแจกแจงพลังงาน (Energy resolution) ซึ่งพิจารณาจากความกว้างของพีคที่บริเวณครึ่งค่านับ (FWHM) ที่ตำแหน่งพีคพลังงานดังในรูปที่ 2.5 โดยความสามารถในการแจกแจงพลังงานหาได้จากสมการที่ 2.2

$$\text{Energy resolution} = \frac{FWHM \times 100}{E} \quad \% \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

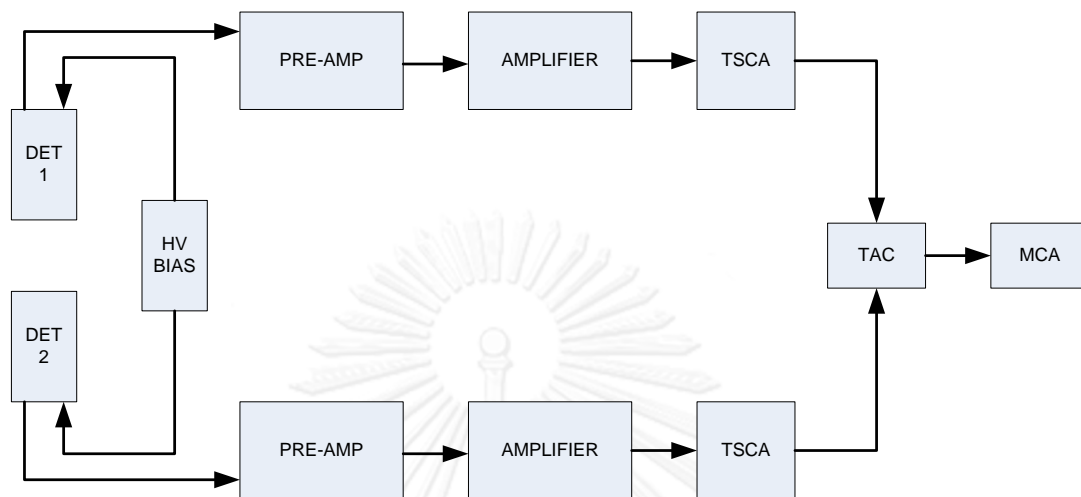


รูปที่ 2.5 ความกว้างของพีคที่บริเวณครึ่งค่านับ (FWHM)

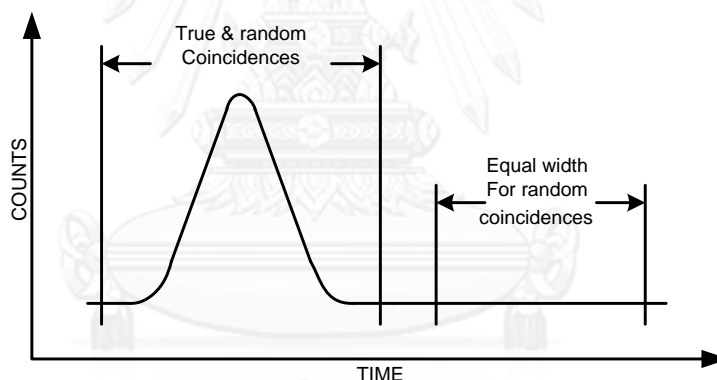
2.1.3 ระบบนับรังสีแบบโคอินซิเดนซ์ (Coincidence counting system) [7]

ระบบวัดรังสีแบบโคอินซิเดนซ์ มีรูปแบบการจัดอุปกรณ์ดังแผนภาพในรูปที่ 2.6 เป็นระบบนับรังสีแบบแยกเฉพาะช่วงเวลา โดยแสดงผลในรูปสเปกตรัมเวลา (Times spectrum) เช่น ระบบนับแบบฟาสต์โคอินซิเดนซ์ (Fast coincidence) ระบบนับแบบสโลว์โคอินซิเดนซ์ (Slow coincidence) เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบวัดรังสีชนิดแบคกราวด์ต่ำ (Low background counting system) จากการใช้เทคนิคตัดแยกสัญญาณพัลส์เชิงเวลา ระบบวัดชนิดนี้ประกอบด้วยระบบนับรังสีแบบนับแยกพลังงาน 2 ชุด โดยหัววัดรังสีของระบบวัดรังสีแต่ละชุดจะต้องเลือกให้เหมาะสมกับชนิดของรังสีที่ต้องการวัดเชิงเวลา เช่น γ - γ , β - γ หรือ α - γ เป็นต้น ที่สำคัญคือ อุปกรณ์วัดในระบบวัดแบบโคอินซิเดนซ์จะต้องมีการตอบสนองสัญญาณที่รวดเร็วและมีตำแหน่งเวลาของพัลส์ที่แน่นอน จึงต้องใช้อุปกรณ์วิเคราะห์ความสูงของพัลส์ที่ให้สัญญาณลอจิกเอาต์พุตที่ตำแหน่งเวลาแน่นอนไม่ขึ้นกับเวลา เช่น อุปกรณ์วิเคราะห์ความสูงของพัลส์ชนิดโทมมิงเอสซีเอ (Timing SCA, TSCA) ในกระบวนการนับนั้นสัญญาณพัลส์จากหัววัดรังสีชุดแรกเป็นตัวเริ่มต้นกระตุ้นการแปลงผันเวลาเป็นความสูงของพัลส์ (Time to Amplitude Converter, TAC) และสัญญาณพัลส์จากหัววัดชุดที่สองเป็นตัวหยุดการแปลงผันเวลา ทำให้ได้ขนาดความสูงของพัลส์ที่เป็นสัดส่วนกับคาบเวลาส่งต่อให้อุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง แสดงสเปกตรัมการกระจายเวลา (Time distribution) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของปริมาณรังสีต่อเวลานับ (N) ที่ตำแหน่งของช่องวิเคราะห์เวลา (t) ต่างๆ จะมีรูปแบบเป็นสเปกตรัมเวลา (Time spectrum) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ตำแหน่งพีคเวลาของสเปกตรัม คือ ตำแหน่งที่หัววัดรังสีทั้งสองตรวจวัดรังสีที่ตกกระทบในเวลาเดียวกัน (True or

actual coincidence) ส่วนบริเวณจำนวนนับที่ฐานสเปกตรัมเป็นผลการตรวจพบรังสีของหัววัดรังสีแบบสุ่ม (Random coincidence)



รูปที่ 2.6 แผนภาพการจักระบบนับรังสีแบบโคอินซิเดนซ์



รูปที่ 2.7 สเปกตรัมเวลาของอนุภาคนิวเคลียร์

2.2 หน่วยของการวัดรังสี [7]

เครื่องวัดรังสีแต่ละชนิดจะมีระบบนับรังสีแตกต่างกันไปตามความต้องการในการสร้างข้อมูลวัดรังสี ขณะที่ผลการวัดรังสีจากระบบนับรังสีในรูปของความเข้มรังสีหรือความเข้มรังสีที่พลังงานต่างๆ จะต้องได้รับการปรับเทียบให้แสดงผลในหน่วยวัดรังสีมาตรฐานก่อนการนำไปใช้งาน โดยหน่วยวัดรังสีมาตรฐาน (Standard radiological unit) ที่กล่าวถึง ได้แก่

2.2.1 ความแรงรังสี (Radioactivity) หมายถึง อัตราการสลายตัวของไอโซโทปรังสีในสารกัมมันตรังสี มีหน่วยวัดเป็น คูรี (Curie, Ci) อ้างอิงจากอัตราการสลายตัวของเรเดียม-226 (Ra-226) ปริสุทธิ์จำนวน 1 กรัม

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ disintegration/second (dps)}$$

สำหรับหน่วย SI จะใช้หน่วยวัดความแรงรังสีเป็น เบคเคอเรล (Becquerel, Bq) โดยนิยามว่า การสลายตัว 1 ครั้งต่อวินาที เท่ากับ 1 Bq ดังนั้น

$$1 \text{ Bq} = 1/3.7 \times 10^{10} = 2.703 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

2.2.2 ความแรงรังสีจำเพาะ (Specific activity) หมายถึง ความแรงรังสีต่อหน่วยน้ำหนักสารกัมมันตรังสี (Ci/g) ในกรณีของสถานะของแข็ง หรือความแรงรังสีต่อหน่วยปริมาตร (Ci/cc) ในกรณีสถานะของเหลว นั่นคือ

$$\text{Specific activity} = \text{activity/mass}$$

2.2.3 พลังงาน (Energy) หมายถึง พลังงานของรังสีซึ่งนิยามจากการเทียบพลังงานจลน์ที่เกิดจากการเร่งอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า ซึ่งมีความต่างศักย์ 1 โวลต์ มีหน่วยวัดเป็น อิเล็กตรอนโวลต์ (electron volt, eV) สำหรับหน่วย SI จะใช้พลังงานเป็น จูล (joule, J) ซึ่งเท่ากับผลคูณของประจุและความต่างศักย์ไฟฟ้า นั่นคือ

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (C \times V)$$

2.2.4 การได้รับรังสี (Radiation exposure) เป็นการวัดด้านความปลอดภัยทางรังสีจากจุดกำเนิดรังสี มีหน่วยวัดเป็น เรินเกนต์ (Roentgen, R) อ้างอิงจากปริมาณรังสีแกมมาที่ทำให้อากาศปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร (0.001293 กรัม ที่ Standard temperature and pressure, STP) มีการแตกตัวเป็นประจุ 1 Electrostatic units, ESU หรือเป็นไอออน 2.082×10^9 คู่ สำหรับหน่วย SI จะใช้หน่วยวัดเป็นคูลอมบ์ต่อน้ำหนัก (C/kg) ดังนั้น

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

และอัตราการได้รับรังสี (Exposure rate) จะวัดเป็น R/min หรือ R/hr

2.2.5 การดูดกลืนปริมาณรังสี (Absorbed dose) หมายถึง หน่วยวัดที่พิจารณาการได้รับรังสีใดๆ ในปริมาณที่เท่ากันของวัสดุ 2 ชนิดที่มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้การดูดกลืนพลังงานแตกต่างกัน ดังนั้นจึงนิยามหน่วยวัดการดูดกลืนพลังงานจากปริมาณรังสีต่อหน่วยมวล เรียกว่า “radiation absorbed dose, rad” โดยนิยามว่า

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ ergs/g}$$

สำหรับหน่วย SI จะนิยามเป็น เกรย์ โดย 1 grey (Gy) เท่ากับ 1 J/kg ดังนั้นจะเทียบได้ว่า

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

2.2.6 สมมูลย์ปริมาณรังสี (Dose equivalent, DE) หมายถึง ปริมาณรังสีที่มีผลกระทบต่อความเสียหายทางชีววิทยา (biological) ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดของรังสีนั้นๆ มีหน่วยวัดเป็น เรม (Roentgen equivalent man, rem) โดย

$$DE = D \times Q$$

เมื่อ D = ปริมาณรังสีที่ดูดกลืนในมวล (absorbed dose)

Q = คุณภาพในการทำความเสียหายทางชีววิทยาของรังสี (quality factor)

สำหรับหน่วย SI ได้นิยามหน่วยวัดใหม่เป็น ซีเวิร์ต (Sievert, Sv) โดยที่

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

ในปัจจุบัน ICRP ได้เปลี่ยนค่าแฟกเตอร์คุณภาพของรังสีเป็น Radiation weighting factor (W_R) แทน และใช้ equivalent dose แทน dose equivalent ดังนั้นในการหาผลรวมของ equivalent dose (H_T) ของกลุ่มเนื้อเยื่อ และอวัยวะต่างๆ สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ $D_{T,R}$ คือ รังสีที่ถูกดูดกลืนเฉลี่ยทั่วบริเวณกลุ่มเนื้อเยื่อหรืออวัยวะ (T) เนื่องจากรังสี (R) และค่า W_R จะมีความสัมพันธ์กับค่า Relative biological effectiveness (RBE) โดยอาศัยการเปรียบเทียบความเสียหายของเนื้อเยื่อ เมื่อเนื้อเยื่อดูดกลืนรังสีที่ต่างชนิด และต่างพลังงานดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่า Radiation weight factor (W_R)

Type and energy range	Radiation weighting factor (W_R)
Photon, all energy	1
Electrons and muons, all energy	1
Neutrons, energy < 10 keV	5
> 10 keV to 100 keV	10
> 100 keV to 2 MeV	20
> 2 MeV to 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protons, other than recoil proton, energy > 2 MeV	5
Alpha particles, fission fragments, heavy nuclei	20

เพื่อการประเมินอันตรายจากรังสี หน่วยงานระหว่างประเทศ International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) ได้กำหนดหน่วยวัดรังสีมาตรฐานสากลไว้ 2 กลุ่มในการวัดรังสี [8] คือ

ก) หน่วยวัดปริมาณการแผ่รังสี (Radiometric quantities) ได้แก่ พลังงาน (Energy, eV) ลำรังสี (Fluence, particles/m²) ฟลักซ์ (Fluence rate หรือ Flux, particles/m²/s) ปริมาณรังสีแผ่รังสีที่อากาศได้รับ (Exposure, C/kg) และ เคอร์มา (Kerma, Gy)

ข) หน่วยวัดปริมาณรังสี (Dosimetric quantities) ได้แก่ ปริมาณรังสีดูดกลืน (Absorbed dose, Gy) ปริมาณรังสีสมมูล (equivalent dose, Sv) และ ปริมาณรังสีผูกพัน (Committed dose, Sv), อัตราปริมาณรังสี (Dose rate, Sv/h)

2.3 การเปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดรังสี [8]

เครื่องวัดรังสีเป็นเครื่องมือที่วัดการเปลี่ยนแปลงทางรังสีผ่านการถ่ายโอนพลังงานและปริมาณรังสีในกระบวนการตรวจวัดรังสี โดยให้ผลการวัดในรูปสัญญาณไฟฟ้า ปริมาณจากการเปล่งแสงเรือง

หรือ ความดำฟิล์ม เป็นต้น ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณที่เกิดขึ้นจะแสดงผลตามนิยามหน่วยวัดรังสีได้ จะต้องมี การเปรียบเทียบ กับค่ามาตรฐาน ด้วยเหตุนี้เครื่องมือวัดรังสีไม่ว่าจะเป็นประเภทแสดงผลทันที (Active monitoring) ที่ผลิตจากบริษัทก่อนออกจำหน่าย รวมถึงการประเมินปริมาณรังสีแบบแสดงผล ภายหลัง (Passive monitoring) ของห้องปฏิบัติการที่ให้บริการอ่านผลจำเป็นต้องมีมาตรฐานการ เปรียบเทียบค่าที่อ่านได้ หรือแม้แต่เครื่องมือวัดรังสีที่ถูกใช้งานมาระยะหนึ่งหรือผ่านการซ่อมบำรุงเมื่อ ชัดข้อง ก็จะต้องมีการเปรียบเทียบชุดเซรแบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งอาจคลาดเคลื่อนไปให้มีการแสดงผลที่ ถูกต้อง

2.3.1 ห้องปฏิบัติการวัดรังสีมาตรฐาน

ตามกฎหมายกำกับดูแลความปลอดภัยทางรังสีนั้น เครื่องมือวัดรังสีที่จะนำไปใช้งาน ได้จะต้องผ่านการรับรองเปรียบเทียบมาตรฐานและยังอยู่ในช่วงเวลาที่กำหนด ดังนั้นห้องปฏิบัติการวัด รังสีมาตรฐานจึงเป็นหน่วยงานสำคัญในการเปรียบเทียบเครื่องมือวัดรังสี โดยห้องปฏิบัติการวัดรังสี มาตรฐานจะแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

ก) ห้องปฏิบัติการวัดรังสีมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary standard dosimetry Laboratory, PSDL) เป็นห้องปฏิบัติการที่มีการวัดหาค่าปริมาณทางรังสีตามนิยามหน่วยวัดรังสี ซึ่งต้องใช้เทคนิค และวิธีการที่ซับซ้อน มีการควบคุมสภาพแวดล้อมและความถูกต้องแม่นยำของเครื่องมือสูง อีกทั้งต้อง ใช้บุคลากรที่มีความชำนาญพิเศษ จึงเป็นห้องปฏิบัติการที่ใช้งบประมาณดำเนินการสูง

ข) ห้องปฏิบัติการวัดรังสีมาตรฐานทุติยภูมิ (Secondary standard dosimetry Laboratory, SSDL) เป็นห้องปฏิบัติการที่มีการวัดรังสีด้วยเครื่องมือวัดรังสีที่มีความแม่นยำสูงหรือมีต้นกำเนิดรังสีที่ ได้รับการเปรียบเทียบจากห้องปฏิบัติการปฐมภูมิ โดยชุดเครื่องมือและต้นกำเนิดรังสีที่ได้รับการเปรียบเทียบ มาแล้วนี้จะถูกใช้เป็นอุปกรณ์มาตรฐานทุติยภูมิ (Secondary standards) สำหรับใช้ในการเปรียบเทียบ เพื่อรับรองความถูกต้องของเครื่องมือวัดรังสีทั่วไป

2.3.2 เทคนิคการเปรียบเทียบมาตรฐานทุติยภูมิ

เทคนิคในการเปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดรังสีแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดรังสีมาตรฐานทุติยภูมิและเปรียบเทียบกับต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน ขึ้นกับความเหมาะสม ในแต่ละกรณี

ก) การเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดรังสีมาตรฐานทุติยภูมิ เป็นการเปรียบเทียบโดยการนำ เครื่องมือที่ต้องการเปรียบเทียบมาเปรียบเทียบกับผลการวัดกับเครื่องมือวัดรังสีมาตรฐานทุติยภูมิ แล้วทำการ ปรับค่าวัดของเครื่องวัดที่นำมาเปรียบเทียบให้มีค่าตรงกัน

ข) การเปรียบเทียบกับต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน เป็นการเปรียบเทียบโดยใช้ต้นกำเนิดรังสี มาตรฐานที่ผ่านการเปรียบเทียบมาแล้วตั้งในรูปที่ 2.7 มีเอกสารรับรองความแรงรังสี หรือมีเอกสาร รับรองค่าปริมาณแผ่รังสีที่ระยะห่างค่าหนึ่ง โดยค่าปริมาณรังสีที่แปรผกผันตามกำลังสองของ ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสี (Inverse square law) จะใช้ในการปรับค่าวัดของเครื่องวัดที่นำมา เปรียบเทียบ



ก) ชุดต้นกำเนิดรังสีแกมมา

ข) ชุดต้นกำเนิดรังสีเอกซ์

รูปที่ 2.8 ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบ

2.4 เครื่องมือวัดด้านความปลอดภัยทางรังสี

เครื่องมือวัดด้านความปลอดภัยทางรังสีต้องสามารถตรวจวัดรังสีได้ทั้งรังสีที่แผ่ออกมาจากแหล่งกำเนิดภายนอกร่างกาย (External exposure) และสารกัมมันตรังสีที่เปราะเปื้อนและสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ก่อให้เกิดการรับรังสีภายในร่างกาย (Internal exposure) ในการแจ้งการตรวจวัดรังสีเพื่อความปลอดภัยทางรังสีจึงแบ่งเครื่องวัดรังสีเป็น 2 ประเภท คือ

2.4.1 เครื่องวัดอัตราปริมาณรังสี (Dose rate meter) เป็นเครื่องวัดที่เลือกใช้หัววัดรังสีที่สามารถวัดรังสีที่มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง ส่วนใหญ่จะวัดได้ทั้งรังสีบีตาและแกมมา ส่วนนิวตรอนจะเป็นเครื่องวัดเฉพาะ เครื่องวัดประเภทนี้มีลักษณะเป็นเครื่องสำรวจรังสี มีหน่วยวัดเป็น ปริมาณรังสีต่อเวลา เช่น $\mu\text{Sv/h}$ หรือ mrem/h ดังแสดงในรูปที่ 2.9 หากต้องการทราบปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.4

$$\text{ปริมาณรังสี (Dose)} = \text{อัตราปริมาณรังสี (Dose rate)} \times \text{เวลา (Time)} \dots\dots\dots (2.4)$$



ก) GM Survey meter



ข) Ionization Chamber Survey meter

รูปที่ 2.9 เครื่องวัดอัตราปริมาณรังสี

นอกจากนี้การวัดปริมาณรังสีที่ร่างกายได้รับยังสามารถใช้โหนดวัดปริมาณรังสีสะสมของเครื่องที่มีการออกแบบไว้ หรือใช้เครื่องวัดปริมาณรังสีประจำบุคคลที่ออกแบบเฉพาะวัดปริมาณรังสีสะสมได้โดยตรง มีหน่วยวัดเป็น μSv , mSv ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 เครื่องวัดปริมาณรังสีสะสม

2.4.2 เครื่องวัดการเปื้อนรังสี (Contamination monitor) เป็นเครื่องวัดรังสีในสถานปฏิบัติการทางรังสีแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก) Surface contamination monitors สำหรับวัดการเปื้อนทางรังสีบนพื้นผิว เป็นเครื่องวัดรังสีที่ใช้วัดความแรงรังสีระดับต่ำๆ ส่วนใหญ่ออกแบบให้วัดรังสีแอลฟา แต่มีบางชนิดที่ใช้วัดรังสีบีตา มีหน่วยวัดเป็น Bq/m^2 ดังแสดงในรูปที่ 2.10. ก

ข) Airborne contamination monitors สำหรับวัดการเปื้อนทางรังสีในอากาศ ได้แก่ ฝุ่นละออง ก๊าซ ไอระเหย เป็นเครื่องวัดรังสีที่ใช้วัดความแรงรังสีจากสารกัมมันตรังสีที่เก็บจากการดูดอากาศและการดักจับที่เหมาะสม มีหน่วยวัดเป็น Bq/m^3 ดังแสดงในรูปที่ 2.10. ข



ก) Surface contamination monitor



ข) Airborne contamination monitor

รูปที่ 2.11 เครื่องวัดการเปื้อนรังสี

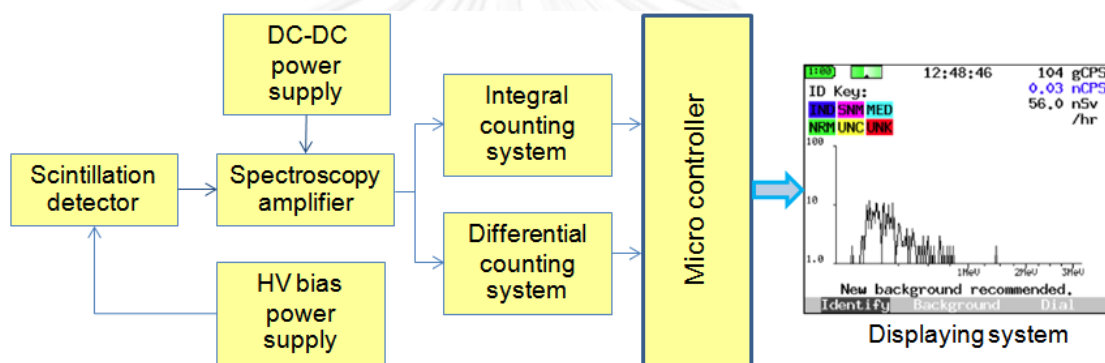
2.5 เครื่องวัดรังสีประเภทระบุชนิดของไอโซโทปรังสี

ปัจจุบันนอกจากเครื่องวัดอัตราปริมาณรังสีที่ออกแบบมาสำหรับการวัดระดับปริมาณรังสีเพื่อ งานด้านความปลอดภัยบริเวณปฏิบัติการทางรังสีแล้ว ยังมีเครื่องวัดรังสีที่ออกแบบเพื่อใช้ในงานด้าน

การตรวจค้นสารกัมมันตรังสีด้านความมั่นคงและการวัดรังสีในสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถวัดได้ทั้งระดับปริมาณรังสี วิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานและระบุนิตของไอโซโทป ณ สถานที่ตรวจวัดทันที อันเป็นสิ่งจำเป็นในการวางแผนจัดการทางรังสีหรือสำรวจบริเวณรังสี ไม่ว่าจะเป็นในกรณีปกติหรือกรณีฉุกเฉินทางรังสี

2.5.1 โครงสร้างของเครื่องวัดรังสีประเภทระบุนิตของไอโซโทปรังสี

เครื่องวัดรังสีประเภทระบุนิตของไอโซโทปรังสีออกแบบให้สามารถวัดได้ทั้งปริมาณรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา รวมทั้งสามารถวัดสเปกตรัมพลังงานและระบุนิตของไอโซโทปรังสีได้ในเครื่องเดียวกัน ดังนั้นองค์ประกอบภายในจึงประกอบด้วยทั้งระบบนับรังสีแบบนับรวมและนับแยกพลังงาน อย่างไรก็ตามเมื่อมีการทำงานที่ซับซ้อนทั้งการวัดและแสดงผลการวัดจึงจำเป็นต้องพึ่งการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ที่ทำงานด้วยโปรแกรมควบคุมพร้อมประมวลข้อมูลจากระบบนับ เพื่อลดการใช้ฮาร์ดแวร์ (Hardware) โดยมีโครงสร้างดังแผนภาพรูปที่ 2.12



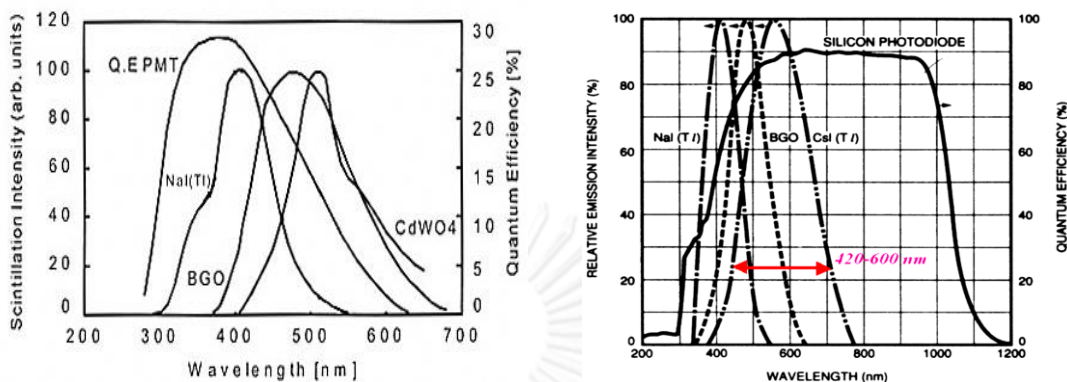
รูปที่ 2.12 แผนภาพของเครื่องวัดประเภทระบุนิตของไอโซโทป

2.5.2 หัววัดรังสีชนิดเรืองรังสี (Scintillation detector) [5]

หัววัดรังสีสำหรับเครื่องวัดรังสีประเภทระบุนิตของไอโซโทปรังสีจะเป็นหัววัดรังสีที่สามารถแจกแจงพลังงานของรังสีได้ ในกรณีที่ต้องการประสิทธิภาพในการวัดรังสีจะเลือกใช้หัววัดชนิดเรืองรังสี โดยโครงสร้างของหัววัดเรืองรังสีจะประกอบด้วยผลึกวัดและอุปกรณ์ไวแสงที่ทำหน้าที่แปลงแสงเรืองเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งรูปแบบอาจจะเป็นผลึกวัดเรืองรังสีชนิด NaI(Tl) ประกอบกับหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube, PMT) หรือผลึกเรืองรังสี CsI(Tl) ประกอบกับพินโฟโตไดโอด (PIN Photodiode) ขึ้นกับความเหมาะสมของช่วงความยาวคลื่นจากประกายแสง (Scintillated light) ที่เกิดขึ้นจากผลึกซินทิลเลเตอร์กับช่วงตอบสนองความยาวคลื่นแสงของโฟโตแคโทดและพินโฟโตไดโอด ดังเส้นกราฟในรูปที่ 2.13

สำหรับข้อดีของการใช้พินโฟโตไดโอดคือ อนุภูมิและสนามแม่เหล็กจะไม่มีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์แปลงแสงเรืองเป็นสัญญาณไฟฟ้าจึงทำให้มีเสถียรภาพการทำงานและยังสามารถสร้างเครื่องมือที่มีขนาดเล็กได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง (High voltage power supply) แต่มีปัญหาเรื่องสัญญาณรบกวนที่เกิดจากรอยต่อในโครงสร้างพินโฟโตไดโอด ซึ่งปริมาณของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามพื้นที่หน้าตัดของตัวพินโฟโตไดโอด

วิธีการที่จะลดสัญญาณรบกวนเหล่านี้ต้องใช้ความเย็นจากอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกคูล (Thermoelectric Device)



ก) NaI(Tl) vs PMT cathode [x]

ข) CsI(Tl) vs PIN photodiode [x]

รูปที่ 2.13 ช่วงการปลดปล่อยความยาวคลื่นของผลึกซิลทิลเลเตอร์และอุปกรณ์ไวแสง

2.5.3 ระบบขยายสัญญาณชนิดสเปกโตรสโกปี

ระบบขยายสัญญาณชนิดสเปกโตรสโกปี (Spectroscopy amplifier) เป็นระบบขยายสัญญาณที่มีช่วงตอบสนองความถี่สัญญาณแคบ (Narrow band) เพื่อขจัดสิ่งรบกวน (Noise) จึงเหมาะกับการขยายสัญญาณพัลส์เพื่อการวิเคราะห์สเปกตรัมความสูงของพัลส์ โครงสร้างของระบบประกอบด้วย วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) ที่สามารถปรับอัตราขยายสัญญาณได้ วงจรลบบ้างขั้ว (Pole-zero cancellation) สำหรับปรับแก้แอมเพอริฟิเคชันที่เกิดจากการประจุที่หลงเหลือจากการส่งผ่านสัญญาณพัลส์ด้วยวงจร CR แต่ละครั้ง วงจรกรองความถี่ (Active filter) ที่สามารถเลือกความถี่คัทออฟ (Cut off) หรือในเชิงเวลาเรียกว่า “เวลาแต่งรูปสัญญาณ (Shaping time)” เพื่อลดสัญญาณรบกวนและได้รับสัญญาณพัลส์ในรูป Unipolar หรือ Bipolar ตามด้วยวงจรปรับแก้ฐานสัญญาณ (Baseline restorer) สำหรับปรับแก้ฐานของสัญญาณพัลส์ให้กลับสู่เส้นฐานศูนย์ของสัญญาณและวงจรขับสัญญาณทางออก

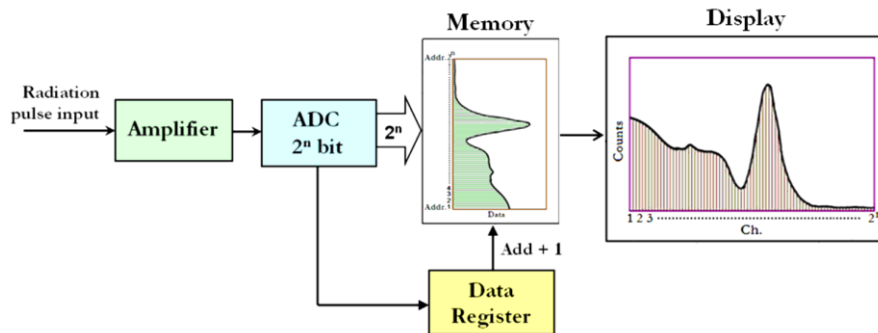
2.5.4 ระบบนับรังสี

ระบบนับรังสีในโครงสร้างเครื่องวัดรังสีชนิดระบุไอโซโทปแบ่งออกเป็น 2 ระบบ

ก) ระบบนับรังสีแบบนับรวม สำหรับนับสัญญาณพัลส์ที่มีความสูงเหนือระดับ ขจัดสิ่งรบกวน (Threshold level) โดยไม่คำนึงถึงความสูงของสัญญาณพัลส์หรือพลังงานของรังสี เพื่อส่งให้ระบบจัดการข้อมูลนำไปประมวลผลเพื่อแสดงผลในหน่วยวัดอัตราพัลส์ (cps) อัตราปริมาณรังสี ($\mu\text{Sv/h}$) และปริมาณรังสีสะสม (μSv)

ข) ระบบนับแบบนับแยกพลังงาน สำหรับคัดเลือกระดับจำนวนรังสีเฉพาะขนาดความสูงของสัญญาณพัลส์แต่ละขนาดที่สอดคล้องกับพลังงานของรังสีแกมมาที่ถ่ายโอนให้กับหัววัดรังสีในรูปการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา (Energy spectrum) โดยอาศัยอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง (MCA) ซึ่งมีหลักการวิเคราะห์ความสูงพัลส์ (PHA) ด้วยการแปลงความสูงของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์

ที่รับมาจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณพัลส์ ให้เป็นข้อมูลดิจิทัลที่เป็นตัวกำหนดตำแหน่งแอดเดรสของหน่วยความจำ (Address Memory) สำหรับบันทึกข้อมูลจำนวนนับรังสี โดยจะทำการบวกจำนวนครั้งของพัลส์ที่มีรหัสดิจิทัลตรงกับแอดเดรสช่องนั้น ๆ ครั้งละ 1 หน่วยนับ ข้อมูลการกระจายความสูงของสัญญาณพัลส์บนหน่วยความจำจะถูกเก็บไว้ในรูปของฮิสโตแกรม (Histogram) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แผนภาพอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง

2.5.5 ระบบแปลงสัญญาณพัลส์อนาลอกเป็นดิจิทัล [5]

ระบบแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (ADC) เป็นระบบแปลงผันสัญญาณเฉพาะตำแหน่งที่สูงสุดของสัญญาณพัลส์ซึ่งได้รับจากวงจรขยายสัญญาณเท่านั้น เนื่องจากตำแหน่งสูงสุดของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์แปรผันตามพลังงานของรังสีนั้น ๆ ปัจจุบันวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่นิยมนำมาใช้งานกับระบบวัดรังสีแกมมาสามารถแบ่งออกตามลักษณะการทำงานได้ 2 ชนิดคือ

ก) วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีเวลาการแปลงผันสัญญาณไม่คงที่ (Wilkinson ADC)

วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลชนิดนี้เป็นแบบนับจำนวนสัญญาณนาฬิกา (Clock) ตามสัดส่วนคาบเวลา ทำให้เวลาแปลงผันสัญญาณไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับขนาดความสูงของสัญญาณอนาลอกอินพุต ข้อดีของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลชนิดนี้ คือ มีความเป็นเชิงเส้นของแปลงผันสัญญาณสูง แต่มีข้อเสีย คือ ใช้เวลาในการแปลงผันสัญญาณนานขึ้นเมื่อขนาดความสูงสัญญาณอนาลอกอินพุตสูงขึ้น

ข) วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีเวลาการแปลงผันสัญญาณคงที่ (Fixed Conversion Time ADC)

วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลชนิดนี้จะใช้เวลาการแปลงผันสัญญาณคงที่ เนื่องจากอาศัยกระบวนการเปรียบเทียบหรืออ่านค่ารหัสไบนารีที่สอดคล้องกับขนาดสัญญาณอนาลอก ดังนั้นเวลาในการแปลงผันสัญญาณจึงไม่ขึ้นอยู่กับความสูงของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ ทำให้มีความเร็วในการแปลงผันสัญญาณสูง แต่ข้อเสียคือมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงกว่าชนิดวิลคินสัน ดังนั้นในการนำมาประยุกต์ใช้กับระบบวัดรังสีแกมมาจึงต้องอาศัยเทคนิคพิเศษในการปรับแก้ความ

ไม่เป็นเชิงเส้น วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีเวลาการแปลงผันสัญญาณคงที่นี้ ได้แก่ วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบแฟลช (Flash ADC) แบบซัคเซสซีฟ แอพรอกซิเมชัน (Successive Approximation ADC, SAR) และแบบไปป์ไลน์ (Pipeline ADC) ซึ่งวงจรทั้ง 3 แบบสามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติในด้าน ความเร็วในการแปลงผันสัญญาณ (Conversion time) ความละเอียดในการแจกแจงรายละเอียดของสัญญาณ (Resolution) และการสูญเสียกำลังไฟฟ้า (Power Dissipation) ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติของ ADC ชนิดเวลาการแปลงผันสัญญาณคงที่แบบต่างๆ

ADC Topology	$F_{\text{CONVERSION}}$	Resolution	Power Dissipation
SAR	< 1 MHz	8 - 18 bits	10 mW
Flash	< 500 MHz	4 - 8 bits	2 W
Pipeline	< 80 MHz	8 - 16 bits	100 mW

2.5.6 ประสิทธิภาพของวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล [5]

สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในระบบแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลของเครื่องวัดรังสีชนิดระบุไอโซโทป คือ ตำแหน่งสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ความสูงพัลส์ซึ่งต้องมีค่าความถูกต้องและเที่ยงตรงสูง เนื่องจากตำแหน่งพีคพลังงานบนสเปกตรัมจะเป็นตัวบ่งบอกพลังงานของรังสีแกมมา นอกจากนี้ต้องสามารถรับอัตรานับรังสีได้รวดเร็ว ดังนั้นตัวแปรที่สำคัญในเลือกวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลจึงสามารถสรุปได้ ดังนี้

ก) ความเร็วในการแปลงผันสัญญาณ (Conversion Time)

วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีความเร็วในการแปลงผันสัญญาณสูงจะช่วยให้ระบบวัดสเปกตรัมรังสีแกมมามีขีดความสามารถในการรับอัตราการนับสูง หรือมีค่าเดดไทม์ (Dead Time) น้อยเมื่อเทียบกับวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีความเร็วในการแปลงผันสัญญาณต่ำ และทำให้ระบบวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาสามารถวัดสัญญาณพัลส์ที่เกิดใกล้ ๆ กันได้ดียิ่งขึ้น

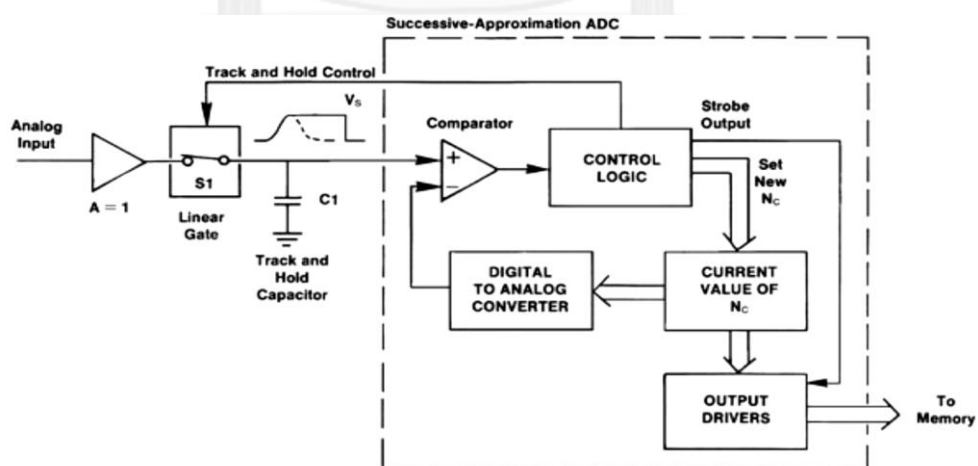
ข) ความเป็นเชิงเส้นของการแปลงผันสัญญาณ (Linearity)

ความเป็นเชิงเส้นของการแปลงผันสัญญาณมีความสำคัญต่อการแจกแจงตำแหน่งของสเปกตรัมพลังงาน หากอุปกรณ์แปลงผันสัญญาณมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงจะทำให้ความถูกต้องในการวิเคราะห์ตำแหน่งพีคพลังงานคลาดเคลื่อน โดยทั่วไปการวัดความเป็นเชิงเส้นของการแปลงผันสัญญาณ จะนิยมวัดในรูปแบบของความไม่เป็นเชิงเส้นของการแปลงผันสัญญาณ (Non-Linearity) ซึ่งแบ่งออกเป็น ความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอินทิกรัล (Integral Non-linearity, INL) และความไม่เป็นเชิงเส้นแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Non-linearity, DNL)

ค) ความละเอียดในการแจกแจงสัญญาณของการแปลงผันสัญญาณ (Resolution)

วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีความละเอียดในการแจกแจงสัญญาณของการแปลงผันสัญญาณสูง จะทำให้สามารถจัดความจุของช่องวิเคราะห์พลังงานได้สูงตามไปด้วย ทำให้ระบบวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาสามารถรองรับการวิเคราะห์พลังงานได้อย่างละเอียด

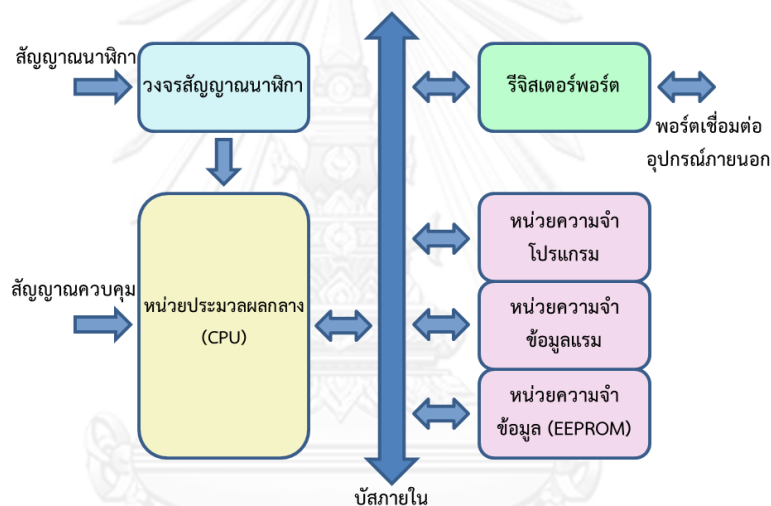
ในปัจจุบันไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นใหม่ ๆ จะสร้างวงจรแปลงผันสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลไว้ภายในชิพ (Built in) เพื่อความสะดวกแก่การประยุกต์ใช้งาน ซึ่งเป็นวงจรแปลงผันสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลแบบซัคเซสซีฟแอฟพรอกซิเมชัน (SAR) ซึ่งทำการแปลงผันสัญญาณโดยใช้วิธีการประมาณค่าของสัญญาณอย่างต่อเนื่อง (Successive approximation method) ภายในวงจรประกอบด้วยคอมพารเตอ์ (Comparator) วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก (Digital to Analog Converter, DAC) และซัคเซสซีฟแอฟพรอกซิเมชันรีจิสเตอร์ (Successive Approximation Register) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 หลักการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบซัคเซสซีฟแอฟพรอกซิเมชันเป็นการแปลงสัญญาณแบบประมาณค่า ด้วยกระบวนการแยกค่าหารแบ่งจำนวนไบนารีจากการเปรียบเทียบขนาดแรงดันของสัญญาณอนาลอกกับแรงดันอ้างอิงตามขนาดบิตนัยสำคัญของรหัสไบนารี กล่าวคือเมื่อมีสัญญาณอนาลอกอินพุตเข้ามาจะถูกตรวจวัดค่าสูงสุดด้วยวงจรพีคดีเทค (Peak detector) และจับค่าแรงดันสูงสุดของสัญญาณนั้นไว้ด้วยวงจรแซมเปิลแอนด์โฮลด์ (Sample and hold) พร้อมทั้งส่งสัญญาณเริ่มทำการวัดและแปลงผันสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลออกไป วงจรจะเริ่มทำการแปลงสัญญาณโดยเปรียบเทียบขนาดสัญญาณอนาลอกกับระดับอ้างอิงไบนารีที่เรียงตามลำดับนัยสำคัญ หากขนาดสัญญาณสูงกว่าครึ่งหนึ่งของระดับอ้างอิงบิตที่มีนัยสำคัญสูงสุด (Most Significant Bit, MSB) ซัคเซสซีฟแอฟพรอกซิเมชันรีจิสเตอร์จะถูกเซตเป็น 1 ขณะที่บิตอื่นถูกเซตค่าเป็น 0 จากนั้นวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอกแปลงค่าที่ได้เป็นแรงดันไฟฟ้า เพื่อให้คอมพารเตอ์ทำการเปรียบเทียบสัญญาณอนาลอก โดยสัญญาณส่วนที่สูงกว่าครึ่งหนึ่งของระดับอ้างอิงบิตที่มีนัยสำคัญสูงสุด จะเลื่อนต่อไปเปรียบเทียบกับบิตที่มีนัยสำคัญรองลงไป ถ้าสัญญาณที่เหลือต่ำกว่าระดับอ้างอิงบิตนี้จะยังคงเป็น 0 สัญญาณจะเลื่อนไปเทียบกับบิตที่มีนัยสำคัญรองลงไปอีก จนกระทั่งครบทุกบิตก็จะสิ้นสุดการแปลงสัญญาณ รหัสดิจิทัลที่ค้างในรีจิสเตอร์เมื่อทำการแปลงสัญญาณเสร็จแล้วคือดิจิทัลเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบซัคเซสซีฟแอฟพรอกซิเมชันนั่นเอง



รูปที่ 2.15 แผนภาพการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบ SAR

2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ [9]

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) คือชิปอิเล็กทรอนิกส์ประมวลผลอย่างหนึ่ง ทำหน้าที่ประมวลผลตามโปรแกรมหรือชุดคำสั่ง โครงสร้างภายในเป็นวงจรรวมขนาดใหญ่ประกอบไปด้วย หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิก บัสต่าง ๆ พอร์ต รีจิสเตอร์ หน่วยความจำ วงจรนับ และวงจรจับเวลา รวมกันอยู่ภายในชิปเดียวกัน ไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในงานควบคุม ที่มีความซับซ้อน สามารถติดต่อกับอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตได้สะดวก ใช้งานง่าย สามารถทำงานได้โดยใช้ชิปเดียว สามารถเข้าถึงข้อมูลระดับบิตได้ ปัจจุบันเทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์ได้มีการพัฒนาให้มีความสามารถในการประมวลผลข้อมูลได้รวดเร็ว มีราคาไม่แพง ง่ายต่อการศึกษาและออกแบบ สามารถเขียนโปรแกรมชุดคำสั่งได้หลายภาษา ตลอดจนมีโปรแกรมช่วยสนับสนุนจำนวนมากเพื่อช่วยในการออกแบบและพัฒนา จึงทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ



รูปที่ 2.16 โครงสร้างเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์

โครงสร้างเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังรูปที่ 2.16 มีส่วนประกอบหลักดังนี้

1. หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (Central processing unit, CPU) ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลตามคำสั่งโปรแกรม โดยส่วนของรีจิสเตอร์จะเก็บข้อมูลและกำหนดการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ การทำงานของซีพียูมี 2 ขั้นตอนคือ เฟตช์ (Fetch) และเอ็กซีคิวต์ (Executed) ขั้นตอนแรกเริ่มจากการเฟตช์ คือการอ่านคำสั่งแล้วทำการถอดรหัสคำสั่งเป็นภาษาเครื่อง จากนั้นในขั้นตอนเอ็กซีคิวต์จะกระทำตามคำสั่งโปรแกรมจนเสร็จ

2. หน่วยความจำสำหรับโปรแกรม (Program memory) ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลโปรแกรมเพื่อส่งให้กับซีพียูทำการประมวลผล หน่วยความจำสำหรับโปรแกรมที่นิยมมี 3 แบบคือ

- 2.1 แบบอีพรอม (Erasable programmable read only memory, EPROM) มีทั้งแบบโปรแกรมได้ครั้งเดียวจะไม่สามารถลบและโปรแกรมใหม่ได้ และแบบโปรแกรมได้หลายครั้งในการลบข้อมูลต้องใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต

2.2 แบบอีอีพรอม (Electrically erasable programmable read only memory, EEPROM) เป็นหน่วยความจำที่สามารถลบและเขียนใหม่ได้ด้วยไฟฟ้า ในปัจจุบันไม่นิยมเพราะมีราคาแพง

2.3 แบบแฟลช (Flash) หน่วยความจำชนิดนี้สามารถลบและเขียนใหม่ได้ด้วยสัญญาณไฟฟ้าเป็นที่นิยมมากเพราะราคาไม่แพง ขนาดของหน่วยความจำโปรแกรมขึ้นอยู่กับตระกูลและเบอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ว่ามีขนาดชุดคำสั่ง และหน่วยความจำเท่าไร เช่น ใน PIC16F877 มีหน่วยความจำโปรแกรม 8192 x 14 บิต

3. หน่วยความจำสำหรับข้อมูล (Data memory) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลจากการประมวลผลของซีพียู มีลักษณะเป็นหน่วยความจำที่เข้าถึงได้แบบสุ่ม RAM (Random access memory)

4. หน่วยความจำข้อมูลแบบอีอีพรอม เป็นหน่วยความจำที่มีในไมโครคอนโทรลเลอร์บางรุ่น ทำหน้าที่เก็บข้อมูลไว้แม้ไม่มีไฟเลี้ยง การอ่านและเขียนข้อมูลจะใช้สัญญาณไฟฟ้า

5. รีจิสเตอร์พอร์ต (Register space) เป็นหน่วยความจำพิเศษสามารถอ่านและเขียนได้ตลอดเวลา ทำหน้าที่เก็บข้อมูลในการทำงาน แสดงสถานะของการทำงาน และกำหนดการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นพอร์ตที่ติดต่อสื่อสารข้อมูลที่รับเข้ามาทางอินพุตและส่งข้อมูลออกทางเอาต์พุตไปยังอุปกรณ์ภายนอก

6. วงจรสัญญาณนาฬิกา ทำหน้าที่ควบคุมจังหวะการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ของบริษัท ไมโครชิป ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มีจำนวนขาตั้งแต่ 6 ขาจนถึง 80 ขา และมีหน่วยความจำโปรแกรมให้เลือกตั้งแต่ 384 ไบต์ถึง 128 กิโลไบต์ PIC ย่อมาจากคำว่า Peripheral Interface Controller ซึ่งภายในตัวของ PIC เองมีหน่วยความจำโปรแกรม หน่วยความจำข้อมูล RAM, EEPROM, Timer, USB, I²C, PWM, และ A/D เป็นต้น โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาอุปกรณ์เสริมจากภายนอก

คุณลักษณะทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC มีดังนี้

ก) ชนิดของหน่วยความจำ

- หน่วยความจำแบบแฟลช โปรแกรมและลบได้หลายครั้ง
- หน่วยความจำแบบโปรแกรมได้ครั้งเดียว OTP (One Time Programmable)
- หน่วยความจำ ROM (Read Only Memory) สามารถโปรแกรมและลบได้หลายครั้ง
- หน่วยความจำข้อมูลภายในตัวมีขนาด 0.5 - 512

ข) จำนวนขาอินพุต - เอาต์พุต

- มีจำนวนขาตั้งแต่ 4 ขา จนถึงมากกว่า 120 ขา

ค) คุณสมบัติอื่น ๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์

- ใช้ไฟเลี้ยงได้ตั้งแต่ +3 V ถึง +5.5 V
- สามารถเลือกจัดวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกาได้ในหลายลักษณะ ดังนี้

1. EC ใช้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก

2. ER ใช้ตัวต้านทาน

3. INTRC ใช้ตัวต้านทานและคาปาซิเตอร์ร่วมกับสัญญาณนาฬิกาภายใน PIC เอง

4. LP ใช้คริสตอลพลังงานต่ำ ความถี่สูงสุดไม่เกิน 200KHz

5. XT ใช้คริสตอล ความถี่ตั้งแต่ 100KHz - สูงสุดไม่เกิน 4MHz

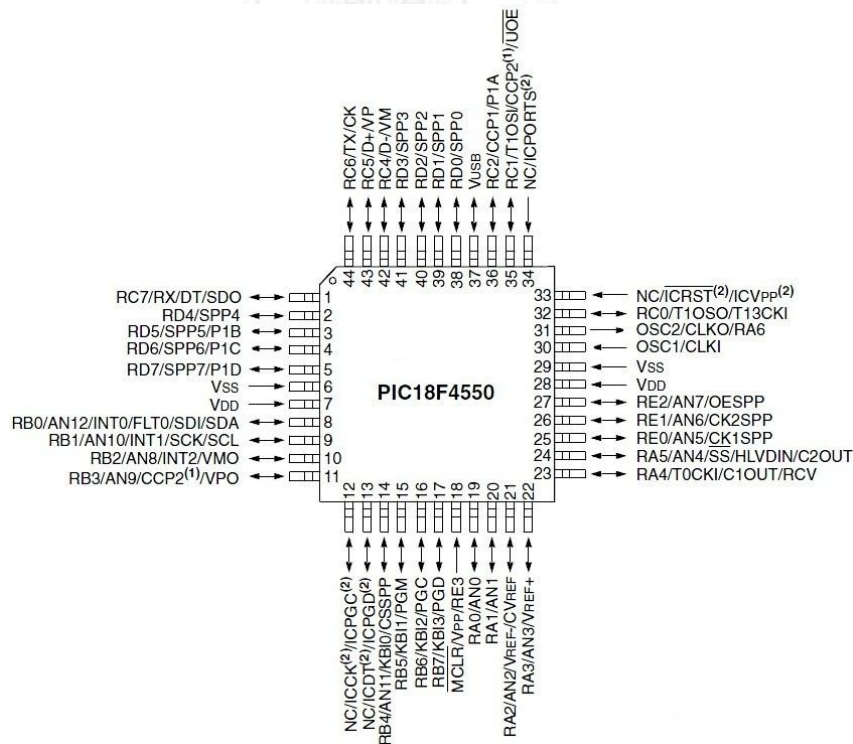
6. HS ใช้คริสตอลความถี่สูงสุดไม่เกิน 20MHz

- ดิจิตอล I/O พอร์ต
- มีช่องอนาล็อกอินพุต
- มีโมดูลเปรียบเทียบแรงดันอนาล็อก
- มีไทมเมอร์ภายในตัว
- ตอบสนองแหล่งกำเนิดการอินเตอร์รัปต์ได้ทั้งภายในและภายนอก
- มีวอตช์ด็อกไทมเมอร์ (WDT)
- มีพอร์ต USB เชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก
- มีโมดูล PWM (Pulse Width Modulator)
- มีโมดูลสื่อสารข้อมูลอนุกรม USART

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC แบ่งออกเป็น 4 รุ่น คือ

- รุ่นที่มีชุดคำสั่งขนาด 12 บิต เบอร์ขึ้นต้นด้วย PIC12C5XXX, 16C5X
- รุ่นที่มีชุดคำสั่งขนาด 14 บิต เบอร์ขึ้นต้นด้วย PIC16F8X, 16F87X
- รุ่นที่มีชุดคำสั่งขนาด 16 บิต เบอร์ขึ้นต้นด้วย PIC17C7XX, 18C2XX
- รุ่นที่มีชุดคำสั่งขนาด 32 บิต เบอร์ขึ้นต้นด้วย PIC32MX3XX/4XX

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้ในการพัฒนาเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาเป็นรุ่น PIC18F4550 มีขาคควบคุมสัญญาณต่างๆ ดังในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4550

ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4550 มีจำนวนขา 44 ขา ซึ่งมีหน้าที่ต่าง ๆ กัน ดังนี้

1. MCLR/V_{pp} (Master clear reset/Programming Voltage input) ทำหน้าที่เป็น
 - ขารีสตาร์ท (Reset) เมื่อขาได้รับสถานะลอจิก “0” ไมโครคอนโทรลเลอร์จะถูกรีเซ็ต ขานี้ปกติจะมีสถานะลอจิก “1” ถูกต่อเข้าไฟเลี้ยงผ่านรีซิสเตอร์
 - ขาแรงดันอินพุตสำหรับการโปรแกรม
 2. V_{DD} ขาต่อไฟเลี้ยงบวก +3 V ถึง +5.5 V
 3. V_{SS} ขากราวด์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า
 4. OSC1/CLKI (Oscillator crystal/ External clock source)
 - ขาอินพุตสัญญาณนาฬิกาหลักเมื่อทำงานในโหมด EC
 - ต่อตัวต้านทานเพื่อกำหนดค่าความถี่ในโหมด ER
 - ขาต่อคริสตอล เมื่อทำงานในโหมด LP XT และ HS
 5. OSC2/CLKO (Oscillator crystal/ External clock source)
 - เอาต์พุตสัญญาณนาฬิกาหลัก เมื่อทำงานในโหมด EC ความถี่เท่ากับ ¼ ของความถี่ที่ขา OSC1
 - ขาต่อคริสตอล เมื่อทำงานในโหมด LP, XT และ HS
 6. ขาพอร์ตมีจำนวน 5 พอร์ต คือ พอร์ต A พอร์ต B พอร์ต C พอร์ต D และพอร์ต E
- พอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4550 เป็นได้ทั้งอินพุตพอร์ตและเอาต์พุตพอร์ต เป็นพอร์ตแบบสองทิศทาง (Bi-directional input output port) สำหรับใช้ในการรับและส่งข้อมูล

2.7 ระบบสื่อสารบลูทูธ [10]

บลูทูธ คือ เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายระยะใกล้แบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless personal area networks, WPAN) เป็นระบบสื่อสารมาตรฐานที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไร้สายขนาดเล็ก เช่น เครื่องพีดีเอ (Personal digital assistant, PDA) อุปกรณ์สื่อสารแบบพกพาหรือเคลื่อนที่รวมไปถึงการเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตผ่านอุปกรณ์ปลายทางที่ให้บริการ

2.7.1 ประวัติของบลูทูธ

คำว่า “บลูทูธ” มาจากชื่อของกษัตริย์ชาวเดนมาร์กที่มีพระนามว่า ฮาราลด์ บลาทานด์ (Herald Blatand) หรือ ฮาราลด์ บลูทูธ (Harald Bluetooth) ซึ่งครองราชย์ในปี ค.ศ. 940 – ค.ศ. 985 โดยพระองค์ทรงเป็นผู้ที่รวบรวมอาณาจักรเดนมาร์กและนอร์เวย์เข้าด้วยกันให้เป็นปึกแผ่น ซึ่งมีลักษณะคล้ายจุดประสงค์ของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายชนิดนี้ ที่ต้องการรวบรวมการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์การสื่อสารชนิดต่าง ๆ ให้เป็นเครือข่ายหนึ่งเดียว ดังนั้นเทคโนโลยีการสื่อสารชนิดนี้จึงได้ชื่อว่า บลูทูธ

2.7.2 หลักการพื้นฐานของบลูทูธ

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายบลูทูธ ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ทำให้สะดวกต่อการใช้งาน เนื่องจากไม่จำกัดพื้นที่ ไม่ต้องใช้สายสัญญาณ สามารถเชื่อมต่อได้ไกล เช่น การส่งข้อมูลจากโทรศัพท์เคลื่อนที่เครื่องหนึ่งไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่อีกเครื่องหนึ่ง หากส่งผ่านสายสัญญาณจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เสริมเพื่อทำให้อุปกรณ์ทั้งสองเชื่อมต่อกันได้ แต่

เทคโนโลยีบลูทูธช่วยให้การส่งข้อมูลของอุปกรณ์ทั้งสองสะดวกขึ้นโดยการส่งผ่านคลื่นวิทยุ ระบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคลที่ใช้เชื่อมต่อโดยตรงระหว่างอุปกรณ์ที่อยู่ใกล้กันชนิดนี้ ในแต่ละเครือข่ายจะมีอุปกรณ์ตัวหนึ่ง เรียกว่า มาสเตอร์ (Master) หรือตัวแม่ข่าย ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานและประสานงานให้กับอุปกรณ์ตัวอื่น ๆ ในเครือข่ายเดียวกัน ส่วนอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อตัวอื่น ๆ เรียกว่า สลาฟ (Slave) หรือตัวลูกข่าย ซึ่งโครงสร้างการทำงานของบลูทูธนี้คล้ายกับระบบบัสอนุกรมแบบใช้ร่วม (Universal serial bus, USB) ที่ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป แตกต่างกันที่การเชื่อมต่อ โดยอุปกรณ์บลูทูธส่วนใหญ่สามารถทำหน้าที่ได้ทั้งมาสเตอร์และสลาฟตามความเหมาะสม ซึ่งภายในเครือข่ายจะมีการจัดการกันเองโดยอัตโนมัติด้วยโปรโทคอลมาตรฐาน (Standard protocol) อุปกรณ์บลูทูธแต่ละตัวจะมีแอดเดรส (Address) หรือการระบุตำแหน่ง ซึ่งเป็นรหัสประจำตัวที่ไม่ซ้ำกับอุปกรณ์ตัวอื่น มีความยาวขนาด 48 บิต เรียกว่า บิตแอดเดรส (BD_ADDR) ใช้ในการจำแนกอุปกรณ์แต่ละตัวและใช้ในการระบุความถี่ที่ใช้สำหรับอุปกรณ์ตัวนั้นๆ ด้วย โดยหลักการการทำงานพื้นฐานของบลูทูธมีส่วนที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

ก) ความถี่คลื่นวิทยุ

ความถี่มาตรฐานสำหรับเทคโนโลยีบลูทูธจะอยู่ในย่านประมาณ 2.4 – 2.483 กิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) ซึ่งช่วงความถี่ที่ใช้งานอาจแตกต่างกันบ้างในบางประเทศ เนื่องจากความถี่ที่ใช้สำหรับบลูทูธเป็นความถี่สาธารณะ (Unlicensed frequency) ไม่ต้องขออนุญาตการใช้งานความถี่ดังกล่าวจากหน่วยงานกำหนดหรือจัดสรรความถี่ของประเทศนั้น ๆ ทำให้การใช้งานความถี่นี้แออัดและอาจถูกรบกวนจากสิ่งต่าง ๆ เช่น คลื่นสัญญาณรบกวนจากเครือข่ายที่อยู่ใกล้กันได้ง่าย ดังนั้นประสิทธิภาพของการใช้งานบลูทูธจึงขึ้นอยู่กับคุณภาพของอุปกรณ์ จำนวนหรือความหนาแน่นของการใช้งานด้วย

ข) ระยะเชื่อมต่อของบลูทูธ

อุปกรณ์บลูทูธถูกแบ่งออกเป็นสามระดับตามความสามารถในการส่งข้อมูลดังนี้
 ระดับหนึ่ง (Class 1) สามารถรับส่งข้อมูลในรัศมี 100 เมตร ใช้พลังงานประมาณ 100 มิลลิวัตต์
 ระดับสอง (Class 2) สามารถรับส่งข้อมูลในรัศมี 10 เมตร ใช้พลังงานประมาณ 2.5 มิลลิวัตต์
 ระดับสาม (Class 3) สามารถรับส่งข้อมูลในรัศมี 1 เมตร ใช้พลังงานประมาณ 1 มิลลิวัตต์

ค) ส่วนประกอบของชุดข้อมูล

ข้อมูลที่รับส่งอยู่ในเครือข่ายบลูทูธ ถูกแบ่งออกเป็นหน่วยย่อย ๆ เรียกว่า พิตีดยู (Packet data unit, PDU) ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งประกอบไปด้วย

ค.1) รหัสการเข้าถึง (Access code) เป็นส่วนที่เก็บข้อมูลหมายเลขเครือข่ายและแอดเดรสหรือตำแหน่งของอุปกรณ์ต้นและปลายทาง มีขนาด 72 บิต

ค.2) ส่วนหัว (Header) เป็นส่วนที่เก็บข้อมูลเส้นทางที่เหมาะสมในการส่งข้อมูล มีขนาดยาว 54 บิต

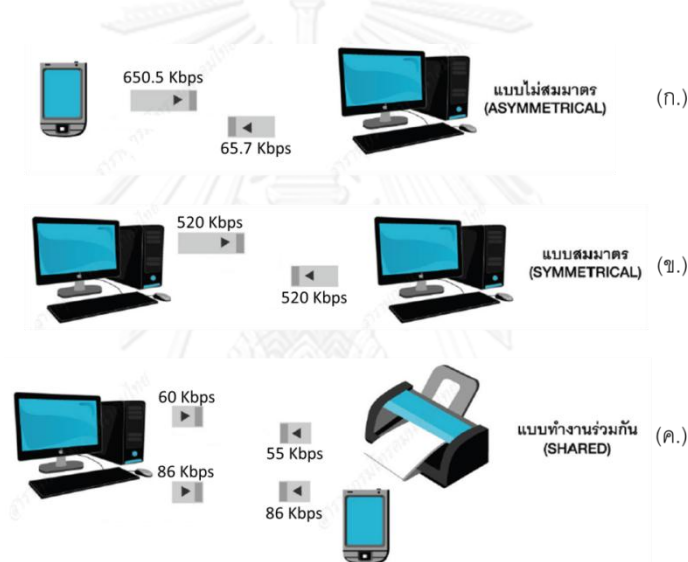
ค.3) ข้อมูล (Payload) คือข้อมูลที่ต้องการส่งไปยังปลายทาง มีขนาดระหว่าง 0 – 2,745 บิต ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างชุดข้อมูลของบลูทูธ

รหัสการเข้าถึง (Access code)	ส่วนหัว (Header)	ข้อมูล (Payload)
72 บิต	54 บิต	0-2745 บิต

ง) อัตราเร็วในการแลกเปลี่ยนข้อมูล

ความเร็วสูงสุดในการส่งข้อมูลของแต่ละช่องสัญญาณประมาณ 1 เมกกะบิตต่อวินาที (Mbps) ทั้งนี้ความเร็วที่ส่งได้จริงอาจน้อยกว่า เนื่องจากความเร็วบางส่วนจะเสียไปจากการควบคุม และการจัดการด้านการส่งข้อมูล นอกจากนี้ผู้ใช้ในแต่ละพีโคเน็ต (Piconet) จะต้องแบ่งความสามารถในการส่งข้อมูลกันด้วย ทำให้ความสามารถในการส่งข้อมูลลดลง



รูปที่ 2.18 รูปแบบการแลกเปลี่ยนข้อมูล

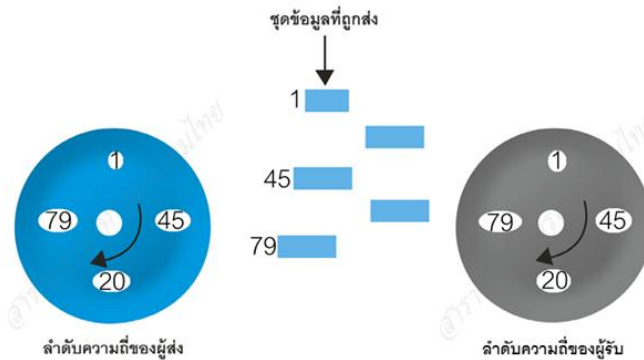
ในรูปที่ 2.18 แสดงความแตกต่างในการส่งข้อมูล ซึ่งความสามารถในการส่งข้อมูลจะต่างกันไปตามรูปแบบของการส่ง จากรูปที่ 2.18 ก. การส่งข้อมูลแบบไม่สมมาตร ความสามารถในการส่งข้อมูลไปและกลับจะไม่เท่ากัน เหมาะกับการส่งข้อมูลขนาดใหญ่ รูปที่ 2.18 ข. การส่งข้อมูลแบบสมมาตร ความสามารถในการส่งข้อมูลไปและกลับเท่ากัน และรูปที่ 2.18 ค. การส่งข้อมูลแบบทำงานร่วมกันหลายอุปกรณ์ แต่ละอุปกรณ์จะแบ่งความสามารถในการส่งข้อมูลกัน ทำให้ความสามารถในการส่งข้อมูลลดลง

2.7.3 พื้นฐานเทคโนโลยีที่ใช้ในบลูทูธ

เทคโนโลยีที่สำคัญซึ่งใช้ในระบบสื่อสารแบบบลูทูธประกอบด้วย

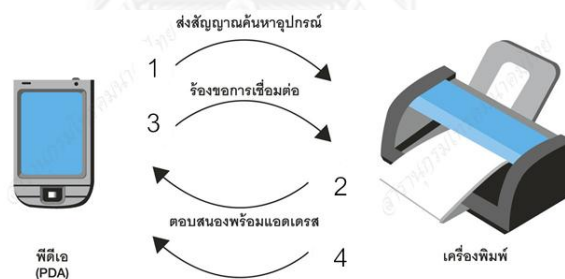
1. การส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุด้วยการแผ่สเปกตรัม (Frequency hopping spread spectrum, FHSS) กระบวนการส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ ผู้ส่งจะส่งข้อมูลบนความถี่ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 79 ช่องสัญญาณ โดยจะมีการส่งข้อมูลไปบนช่องสัญญาณที่เปลี่ยนไปมาอย่างต่อเนื่องตามลำดับที่ได้กำหนดไว้ ผู้รับก็ต้องรับข้อมูลด้วยลำดับความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของช่องสัญญาณที่ผู้ส่งส่ง

มาในเวลาเดียวกัน ดังรูป 2.19 ทั้งนี้เพื่อป้องกันการดักจับข้อมูลจากผู้ใช้อื่น เนื่องจากลำดับความถี่ที่ส่งจะเข้าใจกันระหว่างผู้รับและผู้ส่งเท่านั้น



รูปที่ 2.19 การส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุโดยเปลี่ยนความถี่ไปมา

2. รูปแบบสัญญาณค้นหาอุปกรณ์ (Service discovery protocol) รูปแบบของสัญญาณที่ใช้ในการค้นหาอุปกรณ์บลูทูธที่อยู่ใกล้เคียงกัน ซึ่งกระบวนการนี้เริ่มจากอุปกรณ์บลูทูธส่งสัญญาณซึ่งมีรูปแบบที่เข้ากันใจระหว่างอุปกรณ์บลูทูธ เมื่ออุปกรณ์บลูทูธอื่นพบคลื่นสัญญาณนี้ก็จะตอบสนองกลับมาโดยส่งแอดเดรสประจำเครื่องกลับมาด้วยทำให้อุปกรณ์ทั้งสองสามารถเชื่อมต่อกันได้ในขั้นตอนต่อไป

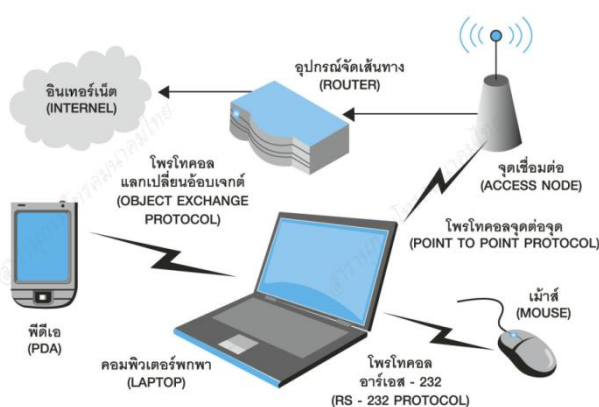


รูปที่ 2.20 รูปแบบการส่งสัญญาณค้นหาอุปกรณ์

รูปที่ 2.20 แสดงตัวอย่างกระบวนการในการค้นหาอุปกรณ์ของเครื่องพีดีเอ เริ่มจากเครื่องพีดีเอส่งสัญญาณเพื่อตรวจหาอุปกรณ์ใกล้เคียง เมื่อเครื่องพิมพ์ตรวจพบก็จะตอบสนองการทำงานโดยระบุเลขแอดเดรสของตัวเองกลับมายังเครื่องพีดีเอ หลังจากนั้นเครื่องพีดีเอร้องขอการเชื่อมต่อไปยังเครื่องพิมพ์ เมื่อเครื่องพิมพ์ตอบรับการเชื่อมต่อ เครื่องพีดีเอก็จะสามารถใช้งานเครื่องพิมพ์ผ่านเครือข่ายบลูทูธได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับซอฟต์แวร์และเงื่อนไขเฉพาะอื่น ๆ ของอุปกรณ์ทั้งสองด้วย

3. รูปแบบการสื่อสาร (Application protocol) คำสั่งหรือกระบวนการที่ถูกใช้โดยโปรแกรมประยุกต์ เพื่อกำหนดขั้นตอนกระบวนการในการรับและส่งข้อมูลถูกพัฒนาขึ้นมาให้มีความเป็นอิสระ โดยเทคโนโลยีหรือโปรแกรมประยุกต์ทั่วไปสามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งระบบสื่อสารบลูทูธได้

นำเอาโปรโตคอลเหล่านี้มาใช้งานในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์การสื่อสารชนิดต่าง ๆ เนื่องจากรูปแบบการสื่อสารจะแตกต่างกันเช่น การเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายบลูทูธระหว่างคอมพิวเตอร์พกพาและเมาส์ (mouse) ใช้โปรโตคอลอาร์เอส - 232 (RS-232) การแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์พกพาและเครื่องพีดีเอใช้โปรโตคอลแลกเปลี่ยนอ็อบเจกต์ (Object exchange, OBEX) และการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์พกพาผ่านจุดเชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์จัดเส้นทาง (router) ใช้โปรโตคอลจุดต่อจุด (Point to point protocol, PPP) ดังรูป 2.21



รูปที่ 2.21 รูปแบบการสื่อสาร

2.7.4 มาตรฐานของระบบสื่อสารบลูทูธ

เทคโนโลยีสื่อสารบลูทูธได้กำหนดมาตรฐานหรือรุ่นของระบบการทำงานโดยได้มีการพัฒนาประสิทธิภาพขึ้นเป็นลำดับ ดังนี้

1. ระบบสื่อสารบลูทูธ 1.0 และบลูทูธ 1.0 B เป็นระบบสื่อสารบลูทูธรุ่นแรกซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1999 แต่ยังคงมีปัญหาข้อจำกัดของระบบอยู่มาก
2. ระบบสื่อสารบลูทูธ 1.1 ได้รับการพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 2001 โดยได้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากบลูทูธรุ่น 1.0 ทำให้บลูทูธรุ่นนี้ทำงานได้ดีขึ้น ใช้มาตรฐาน IEEE Standard 802.15.1 รองรับช่องสัญญาณที่ไม่มีการเข้ารหัส และมีเครื่องมือบอกระดับความแรงของสัญญาณด้วย
3. ระบบสื่อสารบลูทูธ 1.2 ได้รับการพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 2003 สามารถทำงานร่วมกับบลูทูธ 1.1 ได้ ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของบลูทูธรุ่นนี้ได้แก่ การค้นหาสัญญาณและการเชื่อมต่อที่เร็วขึ้น ปรับปรุงความสามารถในการส่งข้อมูลโดยลดสัญญาณรบกวน นอกจากนี้เมื่อเกิดข้อผิดพลาดในการส่งข้อมูลระบบก็จะส่งข้อมูลนั้นใหม่อีกครั้ง
4. ระบบสื่อสารบลูทูธ 2.0+EDR สามารถทำงานร่วมกับระบบบลูทูธ 1.1 ได้เช่นกัน ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 2004 คุณสมบัติสำคัญเน้นในเรื่องของความเร็วในการรับ - ส่งข้อมูล ซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้เร็วถึง 2.1 เมกกะบิตต่อวินาที ด้วยความเร็วสูงสุดของช่องสัญญาณ 3.0 เมกกะบิตต่อวินาที
5. ระบบสื่อสารบลูทูธ 2.1+EDR พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 2007 เน้นการพัฒนาด้านความปลอดภัยในการเชื่อมต่อโดยให้ข้อมูลของเครื่องที่จะเชื่อมต่อเพิ่มมากขึ้น และยังมีโหมดประหยัดพลังงานอีกด้วย

6. ระบบสื่อสารบลูทูธ 3.0+HS พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 2009 โดยเพิ่มความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลเป็น 24 เมกกะบิตต่อวินาที โดยถือว่าเป็นรุ่นที่มีความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูลสูง แต่ไม่สามารถใช้งานกับระบบสื่อสารบลูทูธรุ่นเก่าที่มีความเร็วต่ำได้

7. ระบบสื่อสารบลูทูธ 4.0 และบลูทูธ 4.1 พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 2010 โดยแก้ไขข้อบกพร่องของบลูทูธ 3.0 ที่ไม่สามารถใช้งานร่วมกับบลูทูธรุ่นเก่าได้ จากนั้นในช่วงปี 2010-2013 บลูทูธได้ร่วมมือกับบริษัทอื่น ๆ เพื่อพัฒนาในเรื่องของการประหยัดพลังงาน ทำให้เกิดระบบสื่อสารบลูทูธรุ่นย่อย ๆ อีกหลายรุ่น จนกระทั่งในช่วงปลายปี 2013 จึงเกิดระบบสื่อสารบลูทูธรุ่น 4.1 ขึ้น

2.8 สมาร์ทโฟน (Smartphone)

โทรศัพท์มือถือ คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการสื่อสารสองทางผ่านคลื่นวิทยุ โทรศัพท์มือถือในปัจจุบันนอกจากความสามารถพื้นฐานของโทรศัพท์แล้ว ยังมีคุณสมบัติที่เพิ่มเติมขึ้นมาเช่น การส่งข้อความสั้น (SMS) ปฏิทิน นาฬิกาปลุก ตารางนัดหมาย เกมส์ การใช้งานระบบสื่อสารทางอินเทอร์เน็ต บลูทูธ อินฟราเรด รวมทั้ง กล้องถ่ายภาพ เอ็มเอ็มเอส วิทยุ เครื่องเล่นเพลง และจีพีเอส (Global positioning system, GPS) โทรศัพท์มือถือที่มีความสามารถเพิ่มขึ้นในลักษณะที่คล้ายกับคอมพิวเตอร์พกพาจะถูกกล่าวถึงในชื่อของ “สมาร์ทโฟน” ชนิดของโทรศัพท์มือถือในปัจจุบันอาจแบ่งได้เป็น 3 ชนิดหลักๆ ได้แก่

1. โทรศัพท์พื้นฐาน (Basic phone) หมายถึง โทรศัพท์มือถือที่มีเพียงแค่ฟังก์ชันพื้นฐานในการเป็นโทรศัพท์เท่านั้นคือ สามารถโทรออกและรับสายได้

2. พีดีเอโฟน (PDA phone) หมายถึง โทรศัพท์มือถือที่มีความสามารถพิเศษเพิ่มเติมของพีดีเอ (Personal Digital Assistant, PDA) เข้าไป ทำให้เป็นเหมือนคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก มีความสามารถเพิ่มขึ้นจากโทรศัพท์พื้นฐานเช่น ออแกไนเซอร์ (Organizer) อินเทอร์เน็ต อีเมล เครื่องเล่นมัลติมีเดีย กล้องถ่ายรูป ดิกชันนารี สามารถจัดการและโอนถ่ายข้อมูลผ่านทางคอมพิวเตอร์ได้ โดยพีดีเอโฟนจะมีระบบปฏิบัติการของตัวเองเช่นเดียวกับคอมพิวเตอร์

3. สมาร์ทโฟน (Smartphone) หมายถึง โทรศัพท์มือถือที่มีความสามารถพิเศษ สามารถทำงานได้คล้ายกับคอมพิวเตอร์ แต่อยู่ในรูปลักษณะของโทรศัพท์มือถือ โดยสมาร์ทโฟนจะมีระบบปฏิบัติการเพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานได้ง่าย สามารถติดตั้งแอปพลิเคชันที่ต้องการเพิ่มเติมได้ ในปัจจุบันมีผู้นิยมใช้สมาร์ทโฟนอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถทำงานได้รวดเร็ว เพราะหน่วยประมวลผลมีความเร็วสูง จอภาพมีความละเอียด คมชัด บันทึกข้อมูลได้มากและสามารถเพิ่มหน่วยความจำสำรองได้ สามารถทำงานได้หลายโปรแกรมพร้อม ๆ กัน เนื่องจากมีระบบ multitasking สามารถเปิดอ่านและแก้ไขเอกสารต่าง ๆ ได้เช่น Microsoft Word หรือ PDF ถ่ายรูปได้อย่างคมชัด มีแอปพลิเคชันให้เลือกใช้งานมาก มีขนาดกะทัดรัด สะดวกในการใช้งานเป็นอย่างยิ่ง

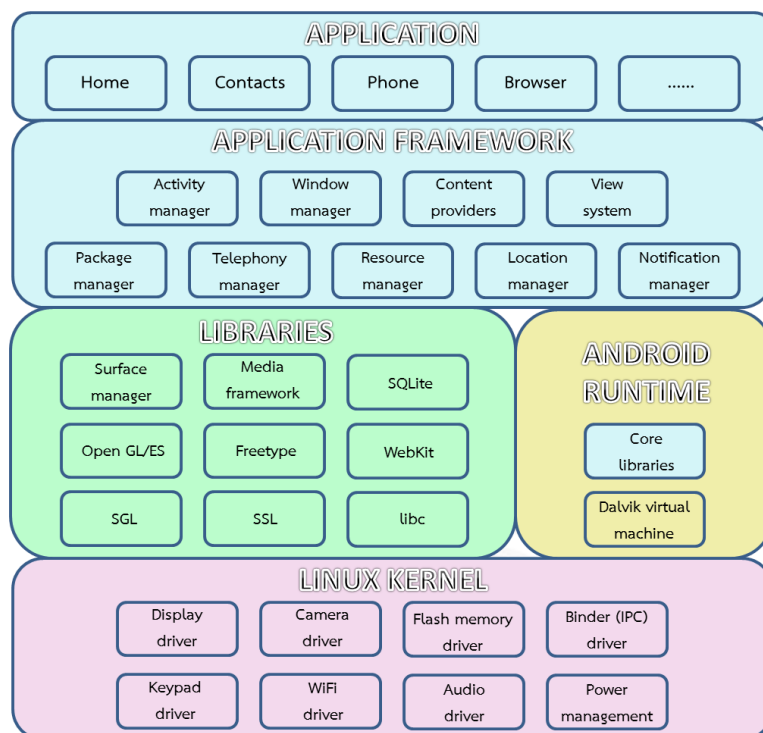
สมาร์ทโฟนมีองค์ประกอบคล้ายกับคอมพิวเตอร์ คือ มีส่วนฮาร์ดแวร์ที่ประกอบกันเป็นสมาร์ทโฟนเพื่อใช้งานและส่วนซอฟต์แวร์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมการทำงานของสมาร์ทโฟนคือระบบปฏิบัติการ (Operating system, OS) [11] เป็นซอฟต์แวร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ประยุกต์ บางครั้งอาจจะเรียกระบบปฏิบัติการว่าเฟิร์มแวร์ (Firmware) ก็ได้ ระบบปฏิบัติการมีหน้าที่หลัก ๆ คือ การจัดสรรทรัพยากรในเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อให้บริการ

ซอฟต์แวร์ประยุกต์ ในเรื่องการรับส่งและจัดเก็บข้อมูลกับฮาร์ดแวร์ เช่น การส่งข้อมูลภาพไปแสดงผลที่จอภาพ การส่งข้อมูลไปเก็บหรืออ่านข้อมูลจากหน่วยความจำ การรับ-ส่งข้อมูลในระบบเครือข่าย การส่งสัญญาณเสียงไปออกที่ลำโพง จัดสรรพื้นที่ในหน่วยความจำตามที่ซอฟต์แวร์ประยุกต์ร้องขอ รวมทั้งทำหน้าที่จัดสรรการใช้หน่วยประมวลผลกลาง ในกรณีที่อนุญาตให้ซอฟต์แวร์ประยุกต์หลาย ๆ ตัวทำงาน (Run) พร้อมกัน ระบบปฏิบัติการช่วยให้ตัวซอฟต์แวร์ประยุกต์ไม่ต้องจัดการเรื่องเหล่านั้นด้วยตนเอง เพียงแค่เรียกใช้บริการจากระบบปฏิบัติการ ทำให้ง่ายต่อการพัฒนาซอฟต์แวร์ประยุกต์ ในปัจจุบันการแข่งขันของตลาดสมาร์ทโฟนมีสูงเนื่องจากมีผู้ผลิตสมาร์ทโฟนหลายค่าย ในแต่ละค่ายก็เลือกใช้ระบบปฏิบัติการที่แตกต่างกันไปเช่น แอนดรอยด์ แอปเปิล iOS วินโดวโฟน แบล็คเบอร์รี่ เป็นต้น

สำหรับสมาร์ทโฟนที่นำมาใช้งานร่วมกับเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น เลือกใช้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (Android) [11] ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการแบบเปิดเผยแพร่ซอฟต์แวร์ต้นฉบับ (Open source) โดยบริษัท กูเกิล (Google Inc.) ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างสูง และสำหรับนักพัฒนาโปรแกรม (Programmer) การพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้งานบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ไม่ใช่เรื่องที่ยากเกินไป เพราะมีข้อมูลในการพัฒนารวมทั้ง Android SDK (Software Development Kit) เตรียมไว้ให้กับนักพัฒนาได้เรียนรู้ และเมื่อต้องการเผยแพร่หรือจำหน่ายโปรแกรมที่พัฒนาแล้วเสร็จ แอนดรอยด์ก็มีตลาดในการเผยแพร่โปรแกรมผ่าน Android market โครงสร้างภาษาที่ใช้ในการพัฒนานั้น สำหรับ Android SDK จะยึดโครงสร้างของภาษาจาวา (Java language) ในการเขียนโปรแกรม เพราะโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะต้องทำงานอยู่ภายใต้ Dalvik Virtual Machine เช่นเดียวกับโปรแกรมจาวาที่ต้องทำงานอยู่ภายใต้ Java Virtual Machine นอกจากนั้นแล้วแอนดรอยด์ยังมีโปรแกรมเกมที่เปิดเผยแพร่ซอฟต์แวร์ต้นฉบับ (Open source) เป็นจำนวนมาก เพื่อให้ให้นักพัฒนาที่สนใจสามารถนำซอฟต์แวร์ต้นฉบับมาศึกษาได้สะดวก

การทำความเข้าใจโครงสร้างของระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ ถือเป็นสิ่งสำคัญเพราะหากนักพัฒนาโปรแกรมสามารถมองภาพโดยรวมของระบบได้ทั้งหมด จะสามารถเข้าใจถึงกระบวนการทำงานได้ดียิ่งขึ้น และสามารถนำไปช่วยในการออกแบบโปรแกรมที่ต้องการพัฒนา เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการทำงานอย่างดียิ่ง

จากโครงสร้างของระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ดังแสดงในรูปที่ 2.32 สามารถแบ่งออกเป็นส่วนที่มีความเกี่ยวเนื่องกัน โดยส่วนบนสุดจะเป็นส่วนที่ผู้ใช้งานทำการติดต่อโดยตรงซึ่งก็คือส่วนของแอปพลิเคชัน (Applications) และสุดท้ายจะเป็นส่วนที่ติดต่อกับอุปกรณ์ผ่านทาง Linux kernel โครงสร้างของแอนดรอยด์ ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานของแต่ละส่วนได้ดังนี้



รูปที่ 2.22 โครงสร้างของระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์

Applications คือส่วนที่ผู้ใช้สามารถเรียกใช้โปรแกรมต่าง ๆ ได้โดยตรง ซึ่งการทำงานของแต่ละโปรแกรมจะเป็นไปตามที่ผู้พัฒนาโปรแกรมได้ออกแบบและเขียนโค้ดโปรแกรม (Code program) เอาไว้

Application framework เป็นส่วนที่มีการออกแบบเพื่อให้นักพัฒนาสามารถพัฒนาโปรแกรมได้สะดวก และมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยนักพัฒนาไม่จำเป็นต้องพัฒนาในส่วนที่มีความยุ่งยากมาก เพียงแค่ศึกษาวิธีการเรียกใช้งาน Application framework ในส่วนที่ต้องการใช้งาน ซึ่งมีอยู่หลายกลุ่ม เช่น Activities manager เป็นกลุ่มของชุดคำสั่งที่จัดการเกี่ยวกับวงจรการทำงานของหน้าต่างโปรแกรม (Activities), Content providers เป็นกลุ่มของชุดคำสั่งที่ใช้ในการเข้าถึงข้อมูลของโปรแกรมอื่น และสามารถแบ่งปันข้อมูลให้โปรแกรมอื่นเข้าถึงได้, View system เป็นกลุ่มของชุดคำสั่งที่เกี่ยวกับการจัดการโครงสร้างของหน้าจอแสดงผลที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน (User interface), Telephony manager เป็นกลุ่มของชุดคำสั่งที่ใช้ในการเข้าถึงข้อมูลด้านโทรศัพท์ เช่น หมายเลขโทรศัพท์, Resource Manager เป็นกลุ่มของชุดคำสั่งในการเข้าถึงข้อมูล, Location manager เป็นกลุ่มของชุดคำสั่งที่เกี่ยวกับตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ที่ระบบปฏิบัติการได้รับค่าจากอุปกรณ์, Notification Manager เป็นกลุ่มของชุดคำสั่งที่ถูกเรียกใช้เมื่อโปรแกรมต้องการแสดงผลให้กับผู้ใช้งานผ่านทางแถบแสดงสถานะ (Status bar) บนหน้าจอแสดงผล เป็นต้น

Libraries เป็นชุดคำสั่งที่พัฒนาด้วยภาษาซี โดยแบ่งชุดคำสั่งออกเป็นกลุ่มตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น Surface manage จัดการเกี่ยวกับการแสดงผล, Media framework จัดการ

เกี่ยวกับการแสดงผลภาพและเสียง, Open GL ES และ SGL จัดการเกี่ยวกับภาพ 2 มิติและ 3 มิติ, SQL lite จัดการเกี่ยวกับระบบฐานข้อมูล เป็นต้น

Android runtime จะมี Dalvik virtual machine ที่ถูกออกแบบเพื่อให้ทำงานบนอุปกรณ์ที่มี หน่วยความจำ (Memory) หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) และพลังงาน (Battery) ที่จำกัด ซึ่งการทำงานของ Dalvik virtual machine จะทำการแปลงไฟล์ที่ต้องการทำงานเป็นไฟล์ .DEX ก่อนการทำงานเพื่อให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อใช้งานกับหน่วยประมวลผลกลางที่มีความเร็วไม่มาก ส่วนต่อมาเป็น Core libraries เป็นส่วนที่รวบรวมคำสั่งและชุดคำสั่งสำคัญที่เขียนด้วยภาษาจาวา (Java Language)

Linux kernel เป็นหัวใจสำคัญในการจัดการของระบบปฏิบัติการเช่น เรื่องหน่วยความจำ พลังงาน การติดต่อกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ความปลอดภัย เครือข่าย โดยแอนดรอยด์ได้นำเอาส่วนนี้มาจากระบบปฏิบัติการลินุกซ์ รุ่น 2.6 (Linux 2.6 Kernel) ซึ่งได้มีการออกแบบมาเป็นอย่างดี

ด้วยเหตุที่กล่าวมาทำให้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และมีส่วนแบ่งตลาดของอุปกรณ์ในด้านนี้เพิ่มขึ้นทุกขณะ ทำให้กลุ่มผู้ใช้งานและกลุ่มนักพัฒนาโปรแกรมให้ความสำคัญกับระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์เพิ่มมากขึ้น ทางด้านของกลุ่มผลิตภัณฑ์ บริษัทผู้ผลิตได้นำเอาระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ไปใช้ในสินค้าของตนเอง พร้อมทั้งมีการปรับแต่งให้ระบบปฏิบัติการมีความสามารถ การจัดวาง โปรแกรม และฟังก์ชันใหม่ ๆ ที่แตกต่างจากคู่แข่งในท้องตลาด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มสินค้าสมาร์ทโฟน และอุปกรณ์จอสัมผัส (Touch screen) โดยมีคุณลักษณะแตกต่างกันไป เช่น ขนาดหน้าจอ ระบบโทรศัพท์ ความเร็วของหน่วยประมวลผล ปริมาณหน่วยความจำ แม้กระทั่งอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) ต่าง ๆ ในด้านของการพัฒนาโปรแกรม บริษัท กูเกิล ได้พัฒนา Application framework เพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นเมื่อนำชุดโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นไปใช้งานกับอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะต่างกันให้สามารถใช้งานร่วมกันได้

ในด้านการเชื่อมต่อเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลกับคอมพิวเตอร์ หรือสมาร์ทโฟนเครื่องอื่น ๆ จะมีพื้นฐานฮาร์ดแวร์รองรับการสื่อสารข้อมูลได้หลายทาง เช่น ระบบสื่อสารทางพอร์ต USB, Bluetooth, GPRS, EDGE และ WLAN เป็นต้น

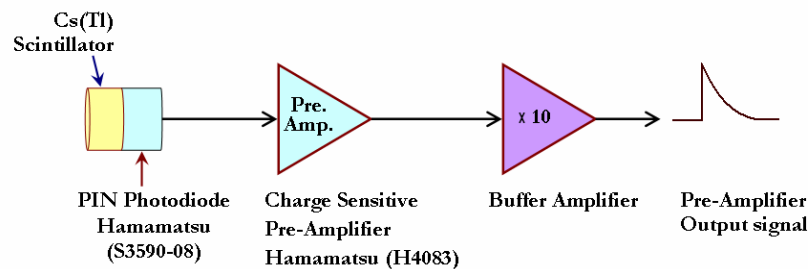
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย

3.1 ข้อมูลพื้นฐานของการออกแบบและสร้างเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมา

เครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ตโฟนที่พัฒนาขึ้น ออกแบบให้สามารถวัดอัตรานับรังสี อัตราปริมาณรังสี แสดงสเปกตรัมรังสีที่ทำการวัด และระบุชนิดไอโซโทปรังสี ระบบวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีมีขนาดช่องวิเคราะห์ 256 ช่อง โดยใช้เอดีซีขนาด 8 บิตบนไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4550 ทำการแปลงสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์เป็นสัญญาณดิจิทัล ควบคุมการทำงานและแสดงผลข้อมูลการวัดรังสีจากสมาร์ตโฟนผ่านทางระบบสื่อสารบลูทูธ เนื่องจากเป็นระบบการเชื่อมต่อแบบไร้สายทำให้เกิดความสะดวกในการใช้งาน

3.1.1 ข้อมูลพื้นฐานสำหรับหัววัดรังสี

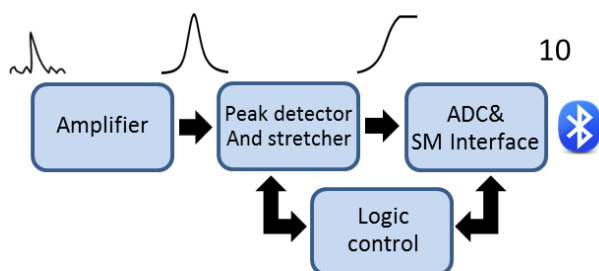
หัววัดรังสีที่นำมาใช้กับเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ออกแบบขึ้น เป็นหัววัดชนิดเรืองรังสีชนิดผลึกซีเซียมไอโอไดต์แอกทิเวตด้วยทาลเลียม (CsI(Tl)) ประกอบกับพินโฟโตไดโอด (PIN-photodiode) ยี่ห้อ Hamamatsu รุ่น S3590-08 ไบอัสกลับทางด้วยไฟฟ้าศักดาต่ำขนาด - 12 โวลต์ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากพินโฟโตไดโอดจะถูกส่งไปยังวงจรขยายสัญญาณส่วนหน้าแบบไวต่อประจุ (Charge sensitive pre-amplifier) ยี่ห้อ Hamamatsu รุ่น H4083 ที่มีความไว 22 mV/MeV และ วงจรบัฟเฟอร์ (Buffer Amplifier) ที่มีอัตราขยายขนาด 10 เท่า โดยแผนภาพการทำงานของหัววัดรังสีและวงจรขยายส่วนหน้าแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของหัววัดรังสีและวงจรขยายส่วนหน้า

3.1.2 ข้อมูลพื้นฐานของเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมา

เครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้นใช้ระบบนับรังสีแบบนับแยกพลังงาน ประกอบด้วยวงจรที่สำคัญได้แก่ วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำ (Low voltage power supply) วงจรขยายสัญญาณพัลส์ (Pulse amplifier) วงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแซมเปิลแอนด์โฮลด์ (Peak detect with sample and hold circuit) วงจรแปลงความสูงสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณดิจิทัล พร้อมระบบสื่อสารบลูทูธ (Pulse height to digital converter with bluetooth) แผนภาพการทำงานระบบวิเคราะห์ของเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพการทำงานของเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น

จากแผนภาพการทำงานของเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้นในรูปที่ 3.2 วงจรขยายสัญญาณพัลส์ทำหน้าที่ขยายและปรับแต่งรูปสัญญาณให้มีอัตราสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N) สูง จากนั้นนำสัญญาณพัลส์ที่ได้มาวิเคราะห์ขนาดความสูง ด้วยการตรวจระดับความสูงของสัญญาณพัลส์ และคงค่าความสูงนั้นไว้ด้วยวงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแซมเปิลแอนด์โฮลด์ (Peak detect with sample and hold circuit) เพื่อส่งให้วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลทำการแปลงความสูงของสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข ตามจังหวะของสัญญาณลอจิกควบคุม และส่งไปยังสมาร์ทโฟนโดยผ่านทางระบบสื่อสารบลูทูธ เพื่อสร้างเป็นข้อมูลการกระจายของพลังงานหรือเรียกว่าสเปกตรัมพลังงานของรังสี สำหรับวิเคราะห์และแสดงผลข้อมูลในรูปแบบที่กำหนดไว้

3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมา

จากแผนภาพโครงสร้างของเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ออกแบบขึ้น ได้มีการพัฒนางจรในส่วนต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำ (Low voltage power supply)

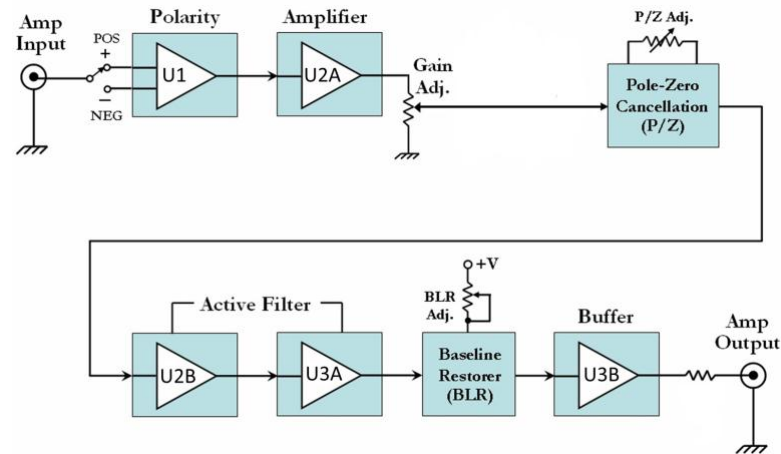
วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำสำหรับเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์ 5 โวลต์ (DC +5 V) จากแบตเตอรี่สำรองของโทรศัพท์มือถือ (Power bank) เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์ ± 12 โวลต์ (DC ± 12 V) เพื่อจ่ายให้กับหัววัดรังสี วงจรขยายสัญญาณพัลส์ และวงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแซมเปิลแอนด์โฮลด์ โดยเลือกใช้โมดูลแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (DC - DC converter) ยี่ห้อ Traco power รุ่น TEL 3-0522



รูปที่ 3.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น

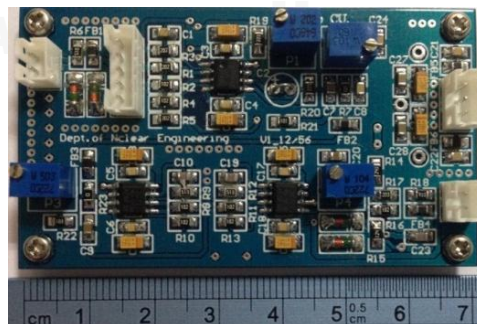
3.2.2 วงจรขยายสัญญาณพัลส์ (Pulse amplifier)

วงจรขยายสัญญาณพัลส์ที่ได้จากหัววัดเครื่องรังสีมีหน้าที่หลัก 2 ประการ คือขยายขนาดสัญญาณพัลส์ และปรับแต่งรูปสัญญาณพัลส์ วงจรขยายสัญญาณพัลส์จะต้องมีการขยายสัญญาณแบบเชิงเส้น (Linear pulse amplifier) เนื่องจากขนาดความสูงของสัญญาณพัลส์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสี นอกจากนี้การแต่งรูปสัญญาณพัลส์ที่เป็นผลจากการกรองความถี่ก็มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ เนื่องจากสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่ได้จากหัววัดรังสี และผ่านวงจรขยายส่วนหน้าจะมีรูปสัญญาณที่มีลักษณะเป็นพัลส์ยอดแหลมรูปเอกซ์โพเนนเชียลคือ มีค่าไรส์ไทม์ (Rise time) ที่สั้นมาก (ประมาณ 5 - 100 ns) ซึ่งไม่สามารถตรวจวัดความสูงสัญญาณพัลส์ได้ อีกทั้งยังมีค่าเวลาการสลายพัลส์ (Decay time) ที่ยาว (ประมาณ 40 - 400 μ s) จึงทำให้สัญญาณพัลส์ที่เข้ามาในช่วงเวลาใกล้เคียงกันเกิดการซ้อนกันระหว่างสัญญาณขาออกของสัญญาณพัลส์ตัวแรกที่กำลังสลายตัวกับขอบขาขึ้นของสัญญาณพัลส์ที่ตามมา เป็นเหตุให้สัญญาณยังไม่ลงสู่เส้นฐานศูนย์ จึงจำเป็นต้องแยกสัญญาณพัลส์แต่ละลูกให้เป็นอิสระจากกัน ดังนั้นวงจรขยายสัญญาณพัลส์ทางนิวเคลียร์จึงต้องมีการปรับแต่งรูปสัญญาณพัลส์ เพื่อให้สัญญาณพัลส์ที่ได้มีความกว้างของสัญญาณพัลส์แคบลง มีช่วงเวลาขาขึ้นและลงที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ ดังนั้นในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณจึงมีการแต่งรูปสัญญาณแบบเกาส์เซียน (Gaussian) หรือใกล้เคียงเกาส์เซียนมากที่สุด

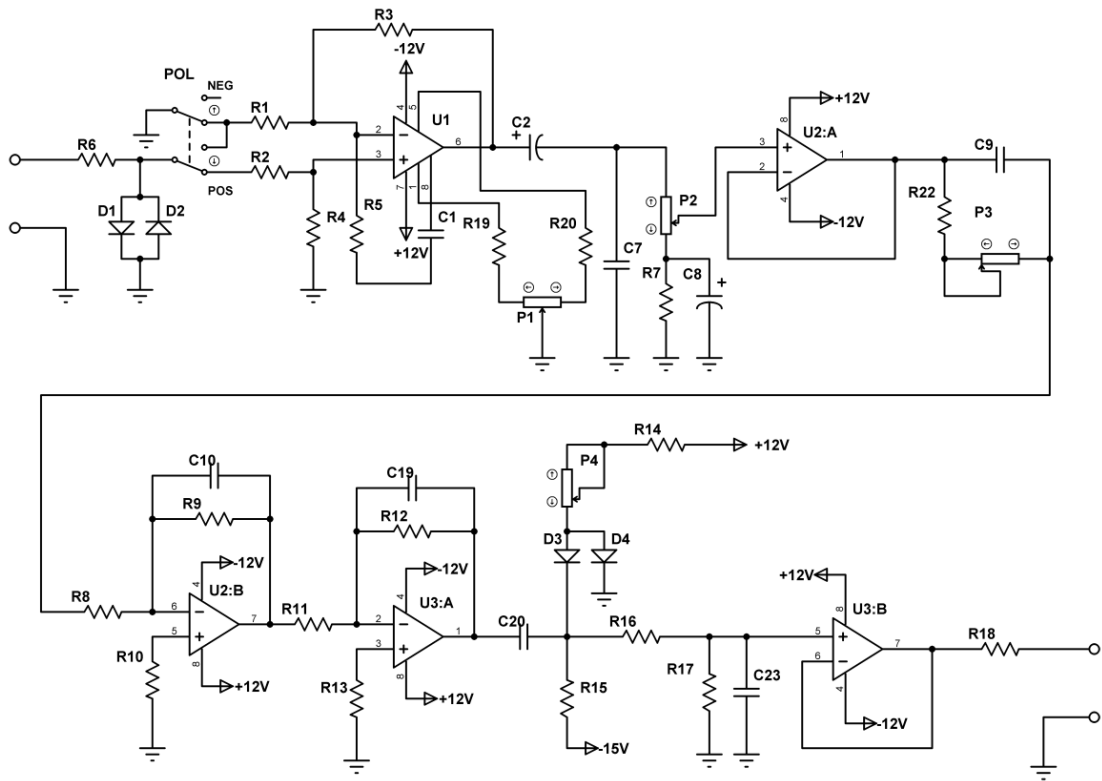


รูปที่ 3.4 แผนภาพการทำงานของวงจรขยายสัญญาณพัลส์

จากแผนภาพการทำงานของวงจรขยายสัญญาณพัลส์ในรูปที่ 3.4 ได้มีการออกแบบให้สามารถปรับเลือกโพลาริตี (Polarity) ของสัญญาณขาเข้าได้ที่ไอซี U1 เพื่อรองรับสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณส่วนหน้าของหัววัดรังสี และปรับอเฟเซตของสัญญาณได้การปรับค่าของตัวต้านทาน P2 จากนั้นสัญญาณพัลส์จะถูกส่งมาขยายสัญญาณที่ไอซี U2A ซึ่งต่อขยายสัญญาณแบบอินเวอร์ตึงสามารถปรับอัตราขยายแบบต่อเนื่อง 1:10 โดยการปรับค่าของตัวต้านทาน P2 ก่อนส่งไปยังวงจรลบค่าโพล (Pole-Zero Cancellation, P/Z) เพื่อปรับแก้แอดเจอร์ชูด (Undershoot) ของสัญญาณเมื่อผ่านวงจรดีฟเฟอเรนเชียลเฟอเรนเชียล โดยการปรับค่าของตัวต้านทาน P3 และจะถูกลดสัญญาณรบกวนและปรับแต่งรูปสัญญาณด้วยวงจรกรองความถี่แบบแอกทีฟ (Active filter) ที่ไอซี U2B และ U3A จากนั้นสัญญาณพัลส์จะถูกปรับฐานของสัญญาณพัลส์ให้กลับสู่ศูนย์ด้วยวงจรปรับแก้ฐานสัญญาณ (Baseline Restorer, BLR) โดยการปรับค่าของตัวต้านทาน P4 สัญญาณพัลส์ที่ผ่านการปรับแก้ฐานสัญญาณส่งผ่านให้วงจรบัฟเฟอร์ที่ไอซี U3B เพื่อป้องกันการโหลดสัญญาณเมื่อส่งไปยังวงจรพีดีทีเทคเตอร์พร้อมแฮมเบิลแอนด์โฮลด์ต่อไป โดยผ่านวงจรขยายสัญญาณพัลส์ และแผนภาพของวงจรขยายสัญญาณพัลส์แสดงดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 แผ่นวงจรขยายสัญญาณพัลส์



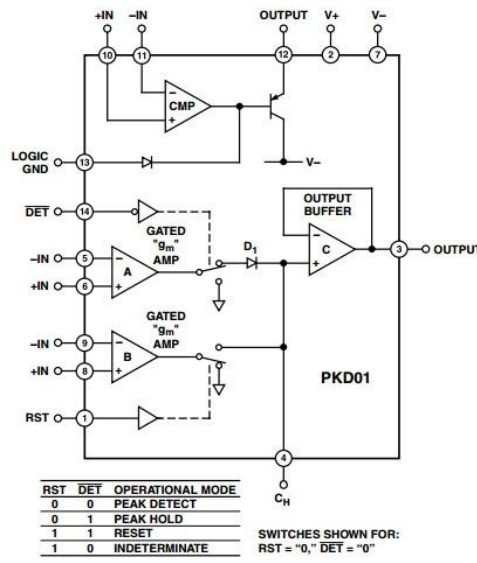
รูปที่ 3.6 แผนภาพวงจรขยายสัญญาณพัลส์

3.2.3 วงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแซมเปิลแอนด์โฮลด์ (Peak detect with sample and hold circuit)

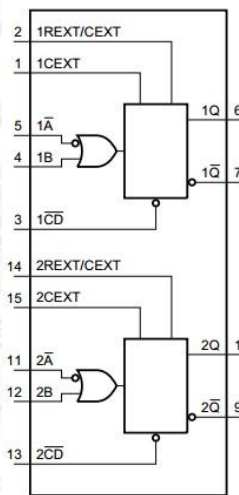
วงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแซมเปิลแอนด์โฮลด์แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ตรวจวัดค่าสูงสุดของสัญญาณ และคงค่าความสูงนั้นไว้ โดยใช้ไอซีเบอร์ PKD01 ซึ่งมีแผนภาพฟังก์ชันการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.7 สำหรับใช้ในการตรวจค่าสูงสุดของสัญญาณพัลส์ที่เข้ามาสู่วงจร จากนั้นคงค่าความสูงของสัญญาณนั้นไว้เพื่อส่งต่อให้วงจรแปลงค่าความสูงของสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณดิจิทัล สัญญาณจากวงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแซมเปิลแอนด์โฮลด์ที่สำคัญ คือ สัญญาณพีคดีเทค ซึ่งจะเป็นตัวประสานการทำงานของวงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแซมเปิลแอนด์โฮลด์กับการสร้างสัญญาณลอจิกควบคุมให้สอดคล้องกัน

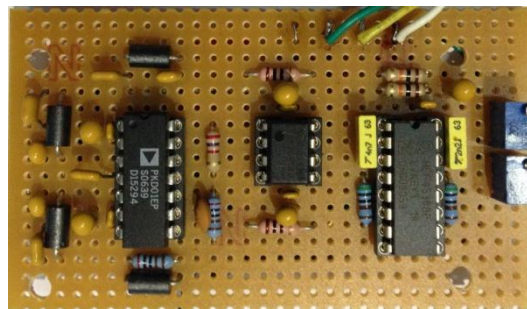
2. วงจรสร้างสัญญาณลอจิกควบคุม โดยใช้ไอซีเบอร์ HFE4538 ซึ่งมีไดอะแกรมฟังก์ชันการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.8 เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแซมเปิลแอนด์โฮลด์ และวงจรแปลงค่าความสูงของสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณดิจิทัลให้ทำงานอย่างสัมพันธ์กัน โดยวงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแซมเปิลแอนด์โฮลด์ที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.9



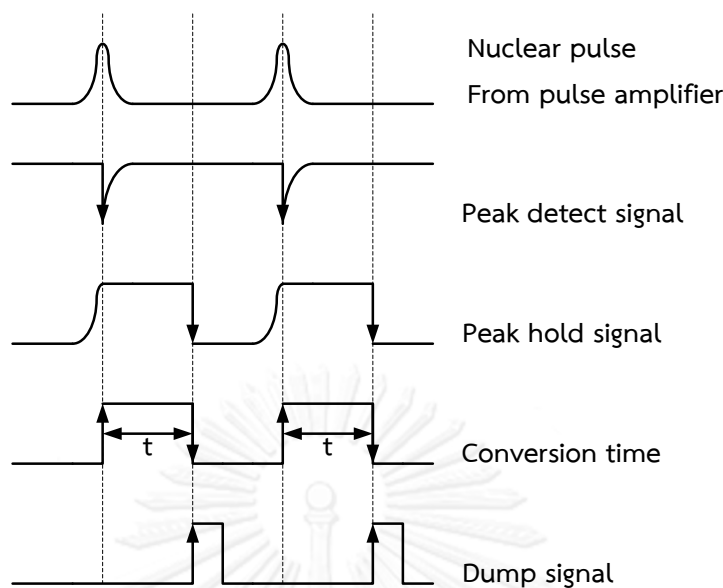
รูปที่ 3.7 แผนภาพฟังก์ชันการทำงานของไอซี PKD01EP



รูปที่ 3.8 แผนภาพฟังก์ชันการทำงานของไอซี HFE4538



รูปที่ 3.9 วงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแชนเนลเปิดแอนดไฮสตร



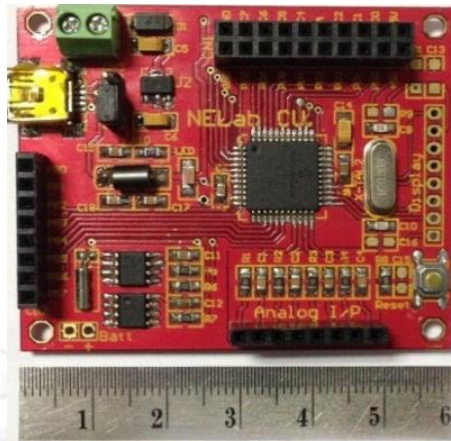
รูปที่ 3.10 แผนภาพแสดงเวลาของสัญญาณต่างๆ ในวงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแอมป์เปิดแอนดโฮลด์

จากแผนภาพแสดงเวลาของสัญญาณต่างๆ ในวงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแอมป์เปิดแอนดโฮลด์ดังแสดงในรูปที่ 3.10 สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้ เริ่มต้นวงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแอมป์เปิดแอนดโฮลด์รับสัญญาณจากวงจรขยายสัญญาณพัลส์ เพื่อตรวจวัดค่าแรงดันสูงสุดของสัญญาณ เมื่อตรวจพบค่าแรงดันสูงสุดของสัญญาณก็จะสร้างสัญญาณพีคดีเทค (Peak detect signal) พร้อมทั้งคงค่าแรงดันสูงสุดของสัญญาณนั้นไว้ (Peak hold) ขณะเดียวกันเมื่อมีสัญญาณพีคดีเทควงจรสร้างสัญญาณลอจิกควบคุม ก็จะสร้างสัญญาณเวลาที่ใช้ในแปลงค่าความสูงสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณดิจิทัล (Conversion time) เพื่อส่งให้วงจรแปลงความสูงสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณดิจิทัลเริ่มกระบวนการแปลงผันค่าความสูงของสัญญาณพัลส์สัญญาณเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขจนกระทั่งกระบวนการเสร็จสิ้น วงจรแปลงความสูงสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณดิจิทัลจะส่งสัญญาณเพื่อรีเซ็ตค่าความสูงของสัญญาณพัลส์ที่คงไว้ (Dump signal) จึงเริ่มรับสัญญาณพัลส์สูงต่อไป เข้ามาในวงจร และดำเนินการซ้ำจนได้ข้อมูลตามจำนวนนับที่ตั้งไว้เพื่อวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานของรังสี

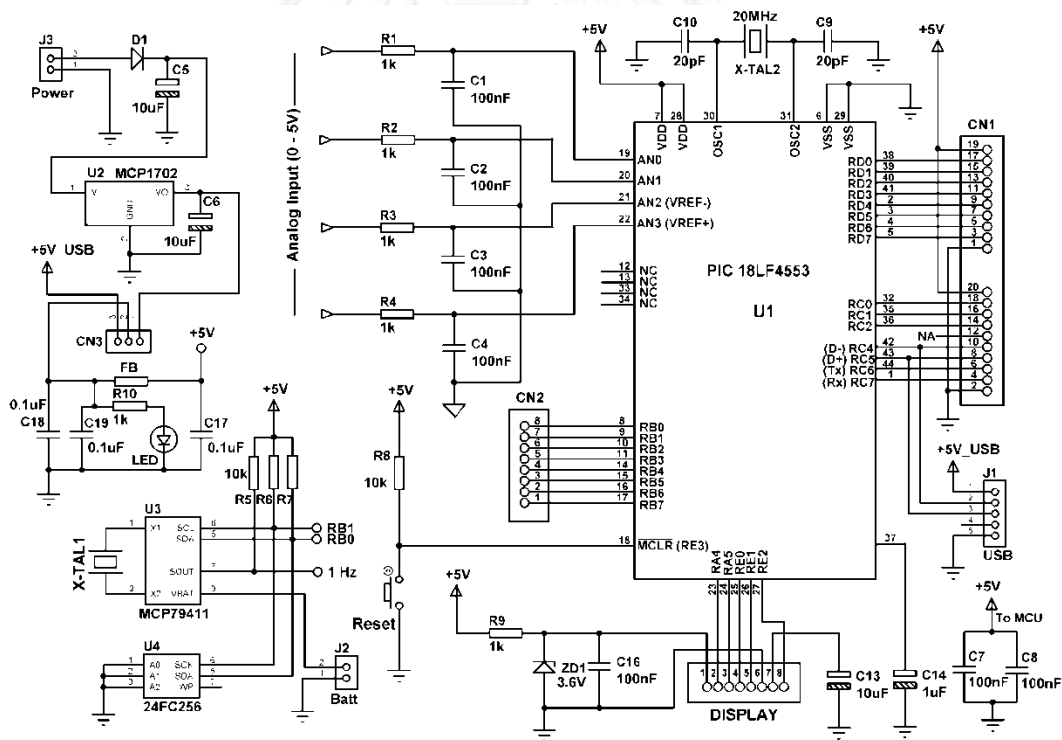
3.2.4 วงจรแปลงความสูงสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณดิจิทัลพร้อมระบบสื่อสารบลูทูธ (Pulse height to digital converter with bluetooth)

การออกแบบวงจรแปลงความสูงสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณดิจิทัลพร้อมระบบสื่อสารบลูทูธ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์จาก Microchip เบอร์ PIC18F4550 เนื่องจากภายในตัวของไมโครคอนโทรลเลอร์มีฟังก์ชันการทำงาน และพอร์ตอินพุต-เอาต์พุตให้เลือกใช้มากมาย รวมถึงฟังก์ชันการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to digital converter) และฟังก์ชันการรับ-ส่งข้อมูลแบบอนุกรม (Universal synchronous Asynchronous receiver transmitter, USART) จึงมีความเหมาะสมในการนำมาออกแบบใช้งานเป็นวงจรแปลงความสูงสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณดิจิทัลและใช้ระบบสื่อสารบลูทูธในการเชื่อมโยงสัญญาณกับสมาร์ทโฟน โดยได้ออกแบบแผ่นวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.11 เพื่อความสะดวก

ในการใช้งานและสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ง่าย โดยแผนภาพของวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.12 แผนภาพวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

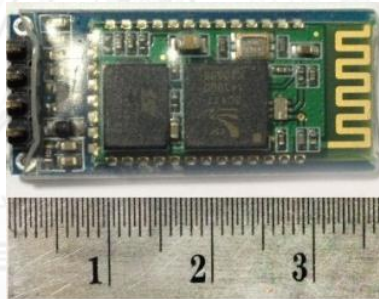
การทำงานของวงจรแปลงความสูงสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณดิจิทัลพร้อมระบบสื่อสารบลูทูธ แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

1. ส่วนการแปลงความสูงสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งเลือกใช้ไมโครแปลงผันสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 8 บิต ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากการความ

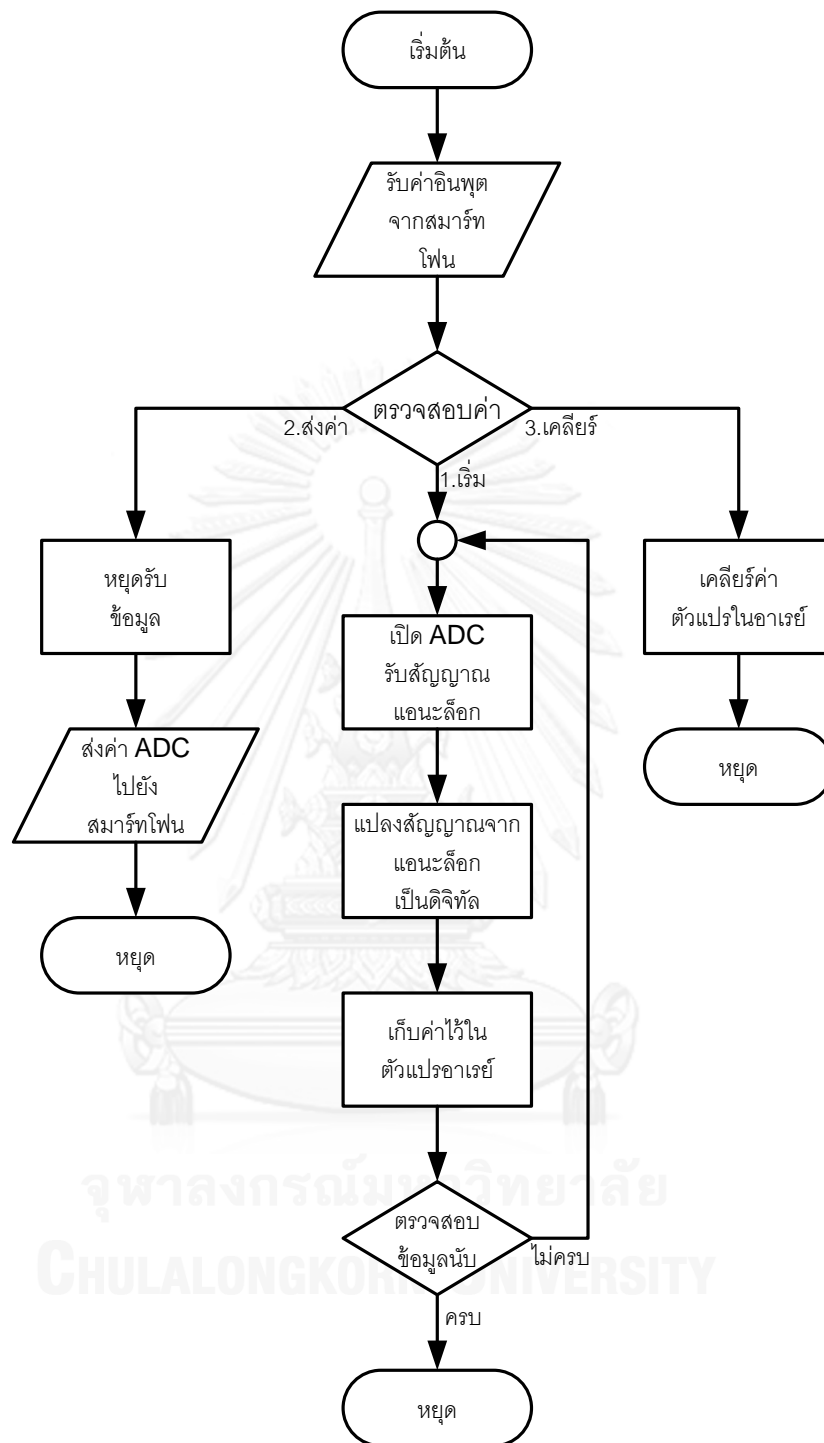
รวดเร็วในการแปลงผันสัญญาณ ความรวดเร็วในการรับ – ส่งข้อมูล อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในการแสดงบนหน้าจอของสมาร์ทโฟน

2. ส่วนเชื่อมโยงสัญญาณกับสมาร์ทโฟน โดยใช้ระบบสื่อสารบลูทูธ จากโมดูลบลูทูธ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อระหว่างวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์กับสมาร์ทโฟนได้แบบไร้สายโดยผ่านทางระบบสื่อสารบลูทูธ ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่มีอยู่แล้วบนสมาร์ทโฟน โดยในการทำงานของวงจรแปลงความสูงของสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณดิจิทัลและเชื่อมโยงสัญญาณกับสมาร์ทโฟนมีขั้นตอนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.14

แผนผังการทำงานของโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ มีขั้นตอนการทำงานคือ เมื่อเชื่อมต่อสัญญาณวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ากับสมาร์ทโฟนโดยผ่านทางบลูทูธแล้ว วงจรจะรอคำสั่งเริ่ม (Start) จากสมาร์ทโฟน จึงเริ่มทำการแปลงค่าความสูงของสัญญาณ (Peak hold signal) ที่ส่งมาจากวงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแอมป์เปิดแอนไฮลด์ โดยเก็บค่าความสูงที่ได้แปลงสัญญาณเชิงตัวเลขไว้ในตัวแปรอาร์เรย์ (Array) จนกระทั่งค่าจำนวนนับสัญญาณที่ช่องวัดใดช่องวัดหนึ่งเท่ากับ 250 โปรแกรมจึงจะหยุดการแปลงสัญญาณและส่งค่าที่ได้แปลงและเก็บไว้ไปยังสมาร์ทโฟน เพื่อสร้างเป็นข้อมูลการกระจายของพลังงานหรือเรียกว่าสเปกตรัมพลังงานของรังสี สำหรับวิเคราะห์และแสดงผลข้อมูลในรูปแบบที่กำหนดไว้ต่อไป



รูปที่ 3.13 โมดูลระบบสื่อสารบลูทูธ



รูปที่ 3.14 แผนผังการทำงานของโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

3.3 การพัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน

แอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ที่พัฒนาขึ้นมีชื่อว่า “Gamma spectrometer, GSM” ดังแสดงในรูปที่ 3.15 โดยใช้เครื่องมือในการพัฒนาแอปพลิเคชันคือ แอปอินเวนเตอร์ (App Inventor) แอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นมีฟังก์ชันหลักในการทำงานแบ่งเป็น 4 ส่วนคือ

1. ส่วนควบคุมการเชื่อมต่อของระบบสื่อสารบลูทูธ ระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กับสมาร์ตโฟน
2. ส่วนแสดงเวลาในการวัดรังสี แสดงผลข้อมูลการวัดรังสี ได้แก่ อัตรานับรังสี (Count rate, CPS) และอัตราปริมาณรังสี (Exposure rate, mR/hr)
3. ส่วนแสดงสถานะการทำงานของเครื่องวัดปริมาณรังสี และจำนวนข้อมูลที่ได้รับเพื่อสร้างสเปกตรัมพลังงานของรังสี
4. ส่วนแสดงสเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาที่วัดได้ ระบุช่องวัดหรือพลังงานที่มีจำนวนนับรังสีมากที่สุด พร้อมทั้งระบุชนิดของไอโซโทปรังสี



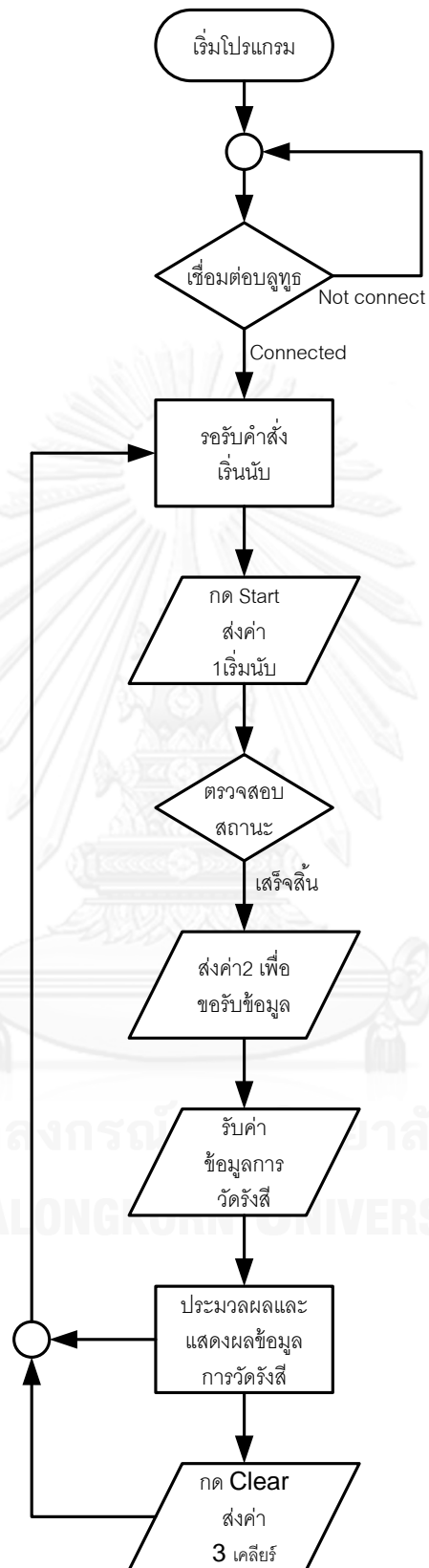
รูปที่ 3.15 แอปพลิเคชัน Gamma spectrometer (GSM)

ขั้นตอนการทำงานของแอปพลิเคชัน เริ่มต้นจากผู้ใช้งานจะต้องเชื่อมต่อสมาร์ตโฟนเข้ากับวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ก่อน เพื่อเป็นการเชื่อมโยงสัญญาณควบคุมระหว่างสมาร์ตโฟนและวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นให้ผู้ใช้งานคลิกที่ปุ่ม “START” โปรแกรมจะส่งสัญญาณเพื่อสั่งให้เริ่มทำการวัดรังสีไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยผู้ใช้งานสามารถติดตามสถานะการทำงานได้จากส่วนแสดงสถานะการทำงาน (Status) จนกระทั่งค่าจำนวนนับสัญญาณที่ช่องวัดใดช่องวัดหนึ่งเท่ากับ 250

โปรแกรมจึงจะหยุดการแปลงสัญญาณ บนแถบสถานะจะแสดงคำว่า “Done” จากนั้นให้ผู้ใช้กดปุ่ม “Plot” วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งค่าข้อมูลการวัดที่แล้วเสร็จมายังสมาร์ทโฟน โปรแกรมจะทำการตรวจสอบว่ารับข้อมูลครบทุกช่องวัดหรือไม่ สังเกตได้จากแถบแสดงสถานะที่ช่องความยาวของข้อมูล (Length) ถ้าจำนวนข้อมูลครบ 256 ช่องวัด โปรแกรมจะนำข้อมูลไปพล็อตเป็นสเปกตรัมพลังงานของรังสี ระบุช่องวัดหรือพลังงานที่มีจำนวนนับรังสีมากที่สุด พร้อมทั้งระบุชนิดของไอโซโทปรังสี และแสดงผลเวลาในการวัดรังสี ผลข้อมูลการวัดรังสี ได้แก่ อัตรานับรังสี (Count rate, cps) และอัตราปริมาณรังสี (Exposure rate, mR/hr) เมื่อผู้ใช้ต้องการทำการวัดรังสีอีกครั้งให้กดปุ่ม “Clear” โปรแกรมจะทำการลบข้อมูลการวัดรังสีในครั้งก่อน และสามารถกดปุ่ม “Start” เพื่อเริ่มการวัดรังสีครั้งใหม่ได้ทันที แผนผังการทำงานของแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.16



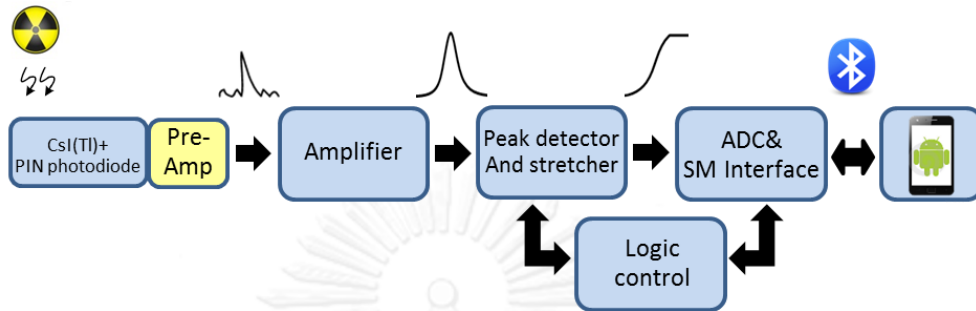
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.16 แผนผังการทำงานของแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น

3.4 เครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ทโฟน

โครงสร้างของระบบวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ทโฟนประกอบด้วยวงจรที่ออกแบบขึ้นทำงานต่อเนื่องกันดังแผนภาพในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แผนภาพการทำงานของเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ทโฟน

แผ่นวงจรต่างๆ ที่ออกแบบขึ้นได้นำมาประกอบเป็นเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานบนสมาร์ทโฟนที่มีขนาดกระทัดรัด สามารถควบคุมการทำงานและแสดงผลข้อมูลการวัดรังสีจากสมาร์ทโฟนผ่านทางระบบสื่อสารบลูทูธ โดยการประกอบภายในของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3.18 และเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาและอุปกรณ์ประกอบที่ทำงานร่วมกันแสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 แผ่นวงจรภายในเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 3.19 เครื่องวัดปริมาณรังสีและอุปกรณ์ประกอบที่ทำงานร่วมกัน

บทที่ 4

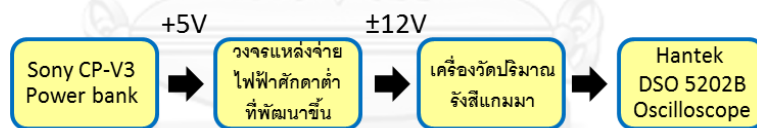
การทดสอบสมรรถนะของระบบ

หลังจากที่พัฒนาเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ทโฟนเสร็จสมบูรณ์แล้ว จึงได้มีการทดสอบสมรรถนะการทำงานของวงจรต่างๆ และการทำงานโดยรวมของเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น ได้แก่

1. การทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าคิกดาต้า
2. การทดสอบระบบวัดส่วนหน้าพร้อมหัววัดรังสีชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI(Tl)
3. การทดสอบวงจรขยายสัญญาณพัลส์
4. การทดสอบวงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแอมป์เปิดแอนด์โฮลด์
5. การทดสอบความเป็นเชิงเส้นในการแปลงความสูงสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข
6. การเปรียบเทียบเครื่องมือวัดรังสีที่พัฒนาขึ้น
7. การทดสอบการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา ระบุชนิดของไอโซโทป และการเปรียบเทียบพลังงาน

4.1 การทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าคิกดาต้า

การทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าคิกดาต้า มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเกตค่าแรงดันไฟฟ้าในขณะที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น และค่าแรงดันกระเพื่อม (Ripple voltage) ในขณะไม่มีโหลด และขณะมีโหลดสูงสุด โดยจัดอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าคิกดาต้า

4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. แบตเตอรี่สำรองของโทรศัพท์มือถือ (Power bank) Sony CP-V3
2. วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าคิกดาต้าที่พัฒนาขึ้น
3. เครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น
4. เครื่องอ่านรูปสัญญาณ (Oscilloscope) ยี่ห้อ Hantek รุ่น DSO 5202B
5. ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ยี่ห้อ Gw instek รุ่น GDM-8246
6. ตัวต้านทานชนิดเซรามิก

4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. จัดอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 4.1
2. ใช้ดิจิทัลมัลติมิเตอร์วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว +12 โวลต์ และ -12 โวลต์ ขณะที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องวัดปริมาณรังสี

3. ใช้เครื่องอ่านรูปสัญญาณบันทึกสัญญาณแรงดันกระแสเพิ่มในขณะที่ไม่มีโหลด และขณะที่มีโหลดสูงสุด โดยคำนวณจากค่ากระแสสูงสุด 125 มิลลิแอมป์ตามที่ผู้ผลิตกำหนด จะต้องใช้โหลดที่มีค่าความต้านทาน 96 โอห์ม โดยในการทดสอบครั้งนี้ใช้ตัวต้านทานชนิดเซรามิกส์ ค่าความต้านทาน 105 โอห์ม

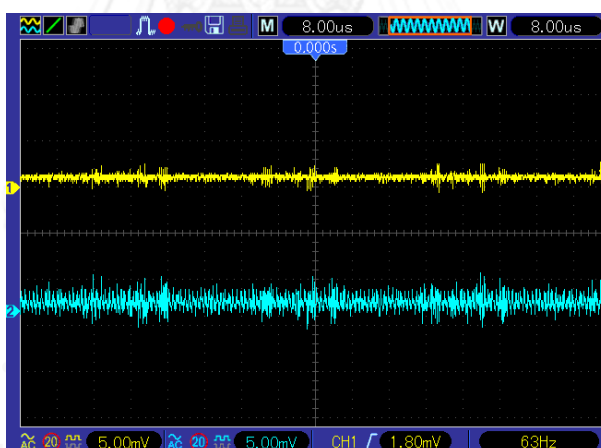
4.1.3 ผลการทดสอบ

1. ผลการทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ขั้ว +12 โวลต์ และ -12 โวลต์ ที่จ่ายให้กับ เครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

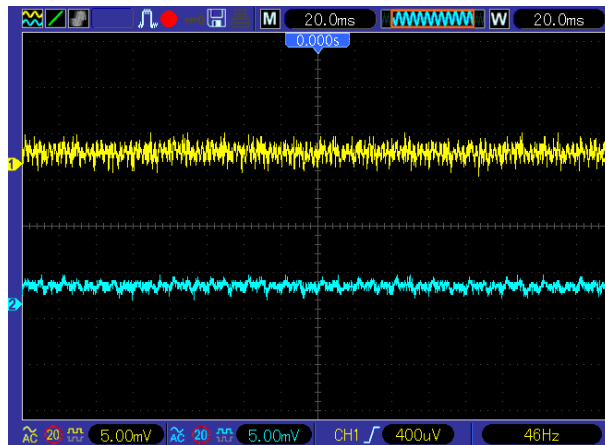
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำขณะที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องวัด ปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (V)	ค่าแรงดันที่วัดได้ (V)
12	12.011
-12	-12.065

2. ผลการทดสอบวัดแรงดันกระแสเพิ่มในขณะที่ไม่มีโหลด และขณะที่มีโหลดสูงสุดพบว่า มีค่าแรงดันกระแสเพิ่มไม่เกิน 5 มิลลิโวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



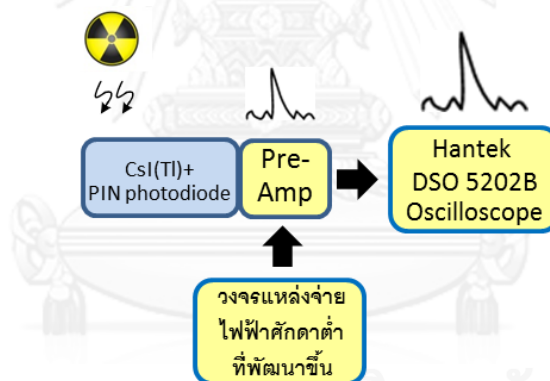
รูปที่ 4.2 สัญญาณแรงดันกระแสเพิ่มขณะไม่มีโหลด



รูปที่ 4.3 สัญญาณแรงดันกระแสเพื่อขณะจ่ายโหลดสูงสุด

4.2 การทดสอบระบบวัดส่วนหน้าพร้อมหัววัดรังสีชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI(Tl)

การทดสอบระบบวัดส่วนหน้าพร้อมหัววัดรังสี มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเกตรูปสัญญาณที่ได้จากการวัดรังสีจริง ก่อนจะนำมาเข้าสู่วงจรขยายสัญญาณพัลส์และปรับแต่งรูปสัญญาณเพื่อนำไปวิเคราะห์สัญญาณต่อไป โดยจัดอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบระบบวัดส่วนหน้าพร้อมหัววัดรังสีชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI(Tl)

4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ต้นกำเนิดรังสี Cs-137
2. หัววัดรังสีชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI(Tl) พร้อมทั้งวงจรขยายส่วนหน้า
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำ ± 12 โวลต์
4. เครื่องอ่านรูปสัญญาณ (Oscilloscope) ยี่ห้อ Hantek รุ่น DSO 5202B

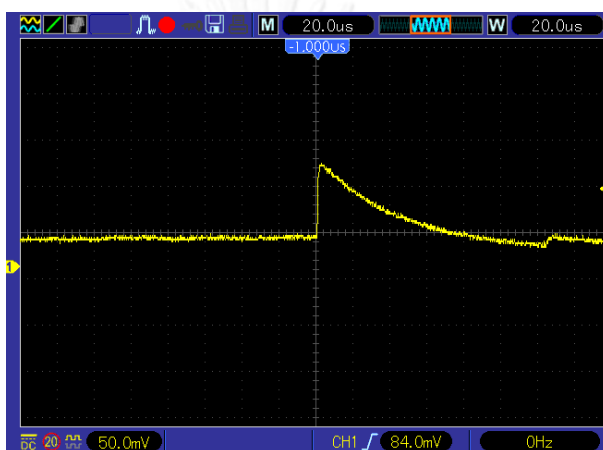
4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. จัดอุปกรณ์ทดสอบดังแผนภาพรูปที่ 4.4

2. ไบอัสหัววัดรังสีชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI(Tl) ด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาต่ำ -12 โวลต์ วัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Cs-137 และอ่านรูปสัญญาณพัลส์ทางด้านเอาต์พุตจาก วงจรขยายส่วนหน้าด้วยเครื่องอ่านรูปสัญญาณ

4.2.3 ผลการทดสอบ

สัญญาณพัลส์ทางด้านเอาต์พุตจากวงจรขยายส่วนหน้าของหัววัดรังสีชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI(Tl) เมื่อทำการวัดต้นกำเนิดรังสี Cs-137 พบว่ามีความสูงของสัญญาณพัลส์เท่ากับ 75 mV เวลาสลายพัลส์ (T) เท่ากับ 60 μ s วงจรขยายส่วนหน้ามีความไว 120 mV/MeV ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 สัญญาณพัลส์ทางด้านเอาต์พุตจากวงจรขยายส่วนหน้าของหัววัดรังสีชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI(Tl)

4.3 การทดสอบวงจรขยายสัญญาณพัลส์

การทดสอบวงจรขยายสัญญาณพัลส์ที่ได้ออกแบบขึ้น มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดสอบรูปสัญญาณพัลส์เอาต์พุต ทดสอบความเป็นไม่เชิงเส้นของอัตราขยายแบบอินทิกรัล (Integral Non-Linearity) โดยจัดอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบสมรรถนะของวงจรขยายสัญญาณพัลส์

4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์เลียนแบบหัววัดรังสี (Pulsar) ยี่ห้อ CANBERRA รุ่น 814FP
2. วงจรขยายสัญญาณพัลส์ที่พัฒนาขึ้น

3. เครื่องอ่านรูปสัญญาณ (Oscilloscope) ยี่ห้อ Hantek รุ่น DSO 5202B

4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. จัดอุปกรณ์ทดสอบดังแผนภาพรูปที่ 4.6

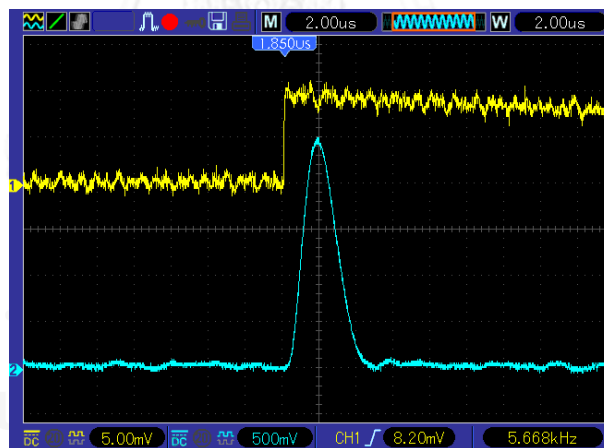
2. ทดสอบอัตราการขยายสูงสุดของวงจรขยายสัญญาณ โดยป้อนสัญญาณพัลส์ขนาด 10 มิลลิโวลต์ จากเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์เลียนแบบหัววัดรังสีให้กับวงจรขยายสัญญาณพัลส์ที่พัฒนาขึ้น ปรับอัตราขยายสูงสุด ทำการบันทึกรูปสัญญาณด้านเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ หลังจากปรับ Pole zero cancellation และ Base line restorer ที่สมบูรณ์แล้วด้วยเครื่องอ่านรูปสัญญาณ ได้สัญญาณเกือบมีรูปเกาเซียนดังรูปที่ 4.7

3. ทดสอบความเป็นไม่เชิงเส้นของอัตราขยายแบบอินทิกรัล โดยตั้งอัตราขยายคงที่ 100 เท่า และปรับขนาดความสูงของสัญญาณพัลส์ขาเข้าจากเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์เลียนแบบหัววัดรังสี บันทึกผลขนาดความสูงสัญญาณพัลส์เอาต์พุตในตารางที่ 4.1

4.3.3 ผลการทดสอบ

1. ผลการทดสอบอัตราการขยายสูงสุด

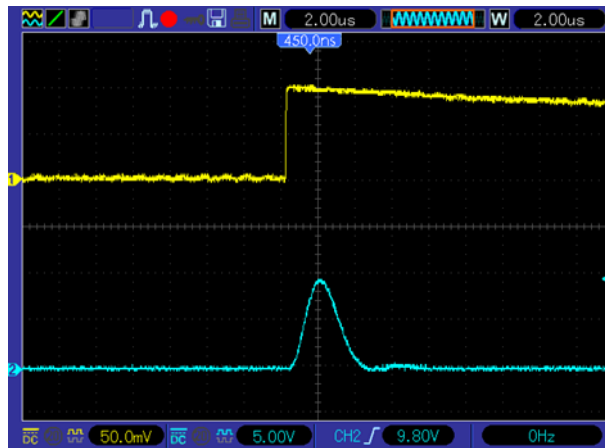
ผลการทดสอบรูปสัญญาณพัลส์เอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณพัลส์แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่ามีอัตราการขยายสูงสุด 250 เท่า รูปสัญญาณพัลส์ที่ได้เป็น Semi Gaussian ที่มีค่าไทม์ทูปิค (Time to peak) และความกว้างสัญญาณพัลส์ (Pulse width) ประมาณ 1 และ 2 μS ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบอัตราการขยายสูงสุด

2. ผลการทดสอบความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตราขยายแบบอินทิกรัล

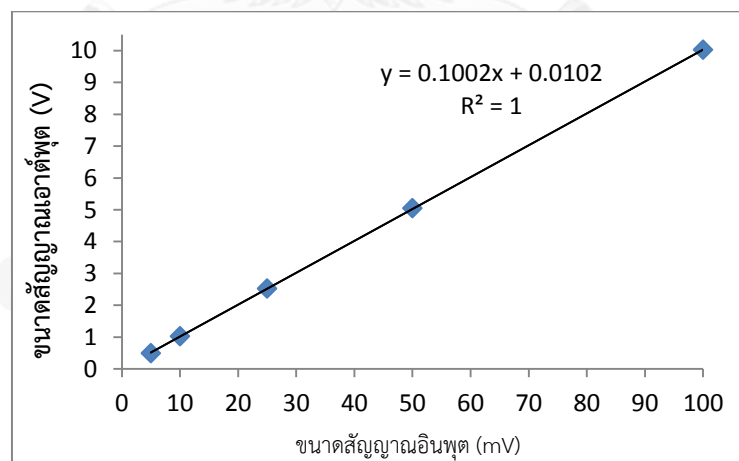
ทำการทดสอบโดยการปรับอัตราขยาย 100 เท่าคงที่ และปรับขนาดความสูงสัญญาณพัลส์ทางอินพุตตั้งแต่ 5-100 มิลลิโวลต์ เพื่อสังเกตและบันทึกค่าสัญญาณพัลส์เอาต์พุต ผลการทดสอบที่อัตราการขยาย 100 เท่าแสดงดังรูปที่ 4.8 และข้อมูลผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.2 จากนั้นนำข้อมูลที่บันทึกได้มาสร้างกราฟแสดงความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตราขยายแบบอินทิกรัล ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบที่อัตราขยาย 100 เท่า

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตราขยายแบบอินทิกรัล

ขนาดสัญญาณอินพุต (mV)	ขนาดสัญญาณเอาต์พุต (V)
5	4.96
10	1.02
25	2.52
50	5.04
100	10.02



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตราขยายแบบอินทิกรัล

จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 สามารถคำนวณหาความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตราขยายแบบอินทิกรัล (INL) ได้จากสมการ

$$INL = \left| \frac{V - V_L}{V_{Max}} \right| \times 100\%$$

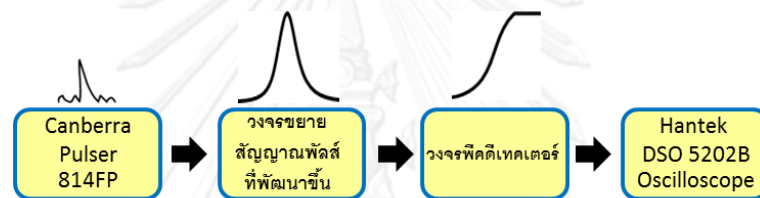
เมื่อ V = ความสูงสัญญาณพัลส์กราฟที่มีการเบี่ยงเบนสูงสุด
 V_L = ความสูงสัญญาณพัลส์จากกราฟเส้นตรง
 V_{Max} = ความสูงสัญญาณพัลส์ทางอินพุตสูงสุดที่ได้จากการกราฟ
 แทนค่าลงในสมการได้

$$INL = \left| \frac{5 - 5.04}{100} \right| \times 100\%$$

$$INL = 0.04\%$$

4.4 การทดสอบวงจรพิกัดดีเทคเตอร์พร้อมแอมป์แอนด์โฮลด์

การทดสอบวงจรพิกัดดีเทค มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความถูกต้องในการตรวจวัดค่าสูงสุดของสัญญาณพัลส์ที่ป้อนเข้ามาในวงจรพิกัดดีเทค โดยจัดอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบสมรรถนะของวงจรพิกัดดีเทค

4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

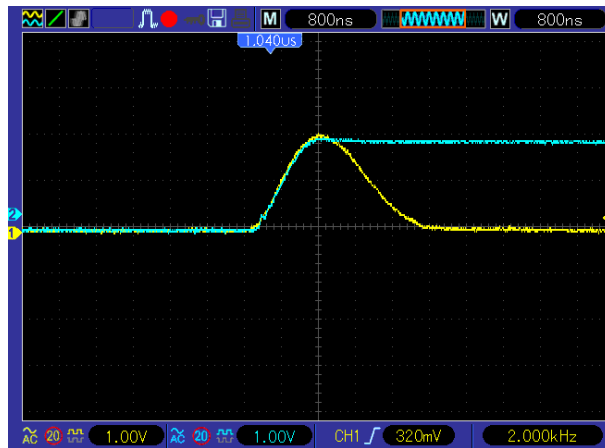
1. เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์เลียนแบบหัววัดรังสี (Pulsar) ยี่ห้อ CANBERRA รุ่น 814FP
2. วงจรขยายสัญญาณพัลส์ที่พัฒนาขึ้น
3. วงจรพิกัดดีเทค
4. เครื่องอ่านรูปสัญญาณ (Oscilloscope) ยี่ห้อ Hantek รุ่น DSO 5202B

4.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. จัดอุปกรณ์ทดสอบดังแผนภาพรูปที่ 4.10
2. ทำการป้อนสัญญาณอินพุตโดยปรับขนาดความสูงของสัญญาณพัลส์ขาเข้าจากเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์เลียนแบบหัววัดรังสีตั้งแต่ 50 มิลลิโวลต์ จนถึง 4.8 โวลต์
3. บันทึกค่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากวงจรพิกัดดีเทค

4.4.3 ผลการทดสอบ

1. รูปสัญญาณที่ได้จากวงจรพิกัดดีเทคที่ขนาดสัญญาณอินพุต 2 โวลต์

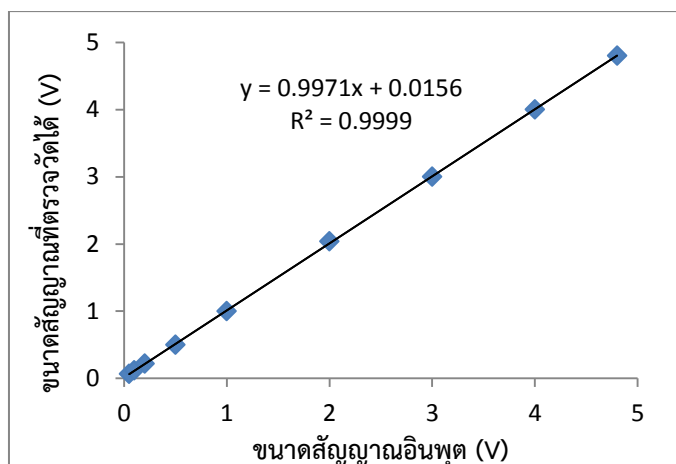


รูปที่ 4.11 รูปสัญญาณที่ได้จากวงจรพีคดีเทคที่ขนาดสัญญาณอินพุต 2 โวลต์

2. ตารางข้อมูลผลการทดสอบค่าที่ได้จากการตรวจวัดความสูงของสัญญาณอินพุตด้วยวงจรพีคดีเทค แสดงดังตารางที่ 4.3 จากผลการทดสอบพบว่ามีความผิดพลาดไม่เกิน 0.28 เปอร์เซ็นต์ และมีความเป็นเชิงเส้นแสดงดังกราฟในรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลผลการทดสอบค่าที่ได้จากการตรวจวัดความสูงของสัญญาณอินพุตด้วยวงจรพีคดีเทค

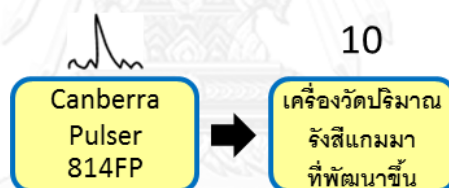
ขนาดสัญญาณอินพุต (V)	ขนาดสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากวงจรพีคดีเทค (V)
0.05	0.064
0.1	0.12
0.2	0.22
0.5	0.5
1	1
2	2.04
3	3
4	4
4.8	4.8



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสัญญาณอินพุตและขนาดสัญญาณที่ตรวจวัดได้

4.5 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นในการแปลงความสูงสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข

การทดสอบความเป็นเชิงเส้นในการแปลงผันสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและช่องวิเคราะห์พลังงาน โดยจัดอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบความเป็นเชิงเส้นในการแปลงความสูงสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข

4.5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์เลียนแบบหัววัดรังสี (Pulsar) ยี่ห้อ CANBERRA รุ่น 814FP

2. เครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ทโฟนที่พัฒนาขึ้น

4.5.2 ขั้นตอนการทดลอง

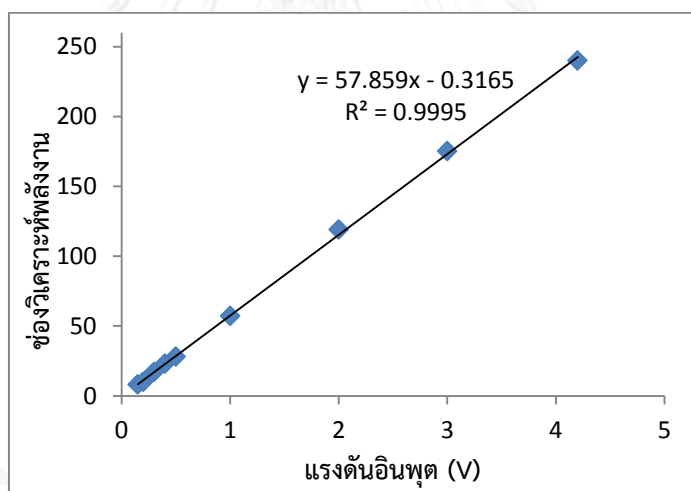
1. จัดอุปกรณ์ทดสอบดังแผนภาพรูปที่ 4.10
2. ทำการป้อนสัญญาณอินพุตโดยปรับขนาดความสูงของสัญญาณพัลส์ขาเข้าจากเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์เลียนแบบหัววัดรังสีตั้งแต่ 150 มิลลิโวลต์ จนถึง 4.2 โวลต์
3. บันทึกค่าช่องวิเคราะห์พลังงานที่วัดได้จากเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ทโฟน

4.5.3 ผลการทดสอบ

1. ข้อมูลผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.4 กราฟแสดงความเป็นเชิงเส้นในการแปลงผันสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข แสดงดังรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นในการแปลงผันสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข

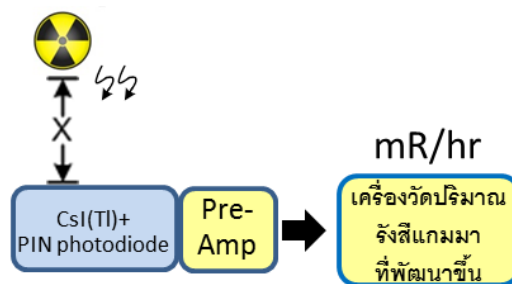
แรงดันอินพุต (V)	ช่องวิเคราะห์พลังงาน
0.15	8
0.2	10
0.3	17
0.4	23
0.5	28
1	57
2	119
3	175
4.2	240



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตและช่องวิเคราะห์พลังงาน

4.6 การเปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดรังสีที่พัฒนาขึ้น

การเปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดรังสีที่พัฒนาขึ้น ด้วยวิธีการการเปรียบเทียบกับต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบความถูกต้องในการวัดรังสีของเครื่องมือวัดรังสีที่พัฒนาขึ้น โดยจัดอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แผนภาพการจัดอุปกรณ์การเปรียบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดรังสีที่พัฒนาขึ้น

4.6.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานซีเซียม-137 ความแรงรังสี 68 mCi
2. เครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ทโฟนที่พัฒนาขึ้น

4.6.2 ขั้นตอนการทดลอง

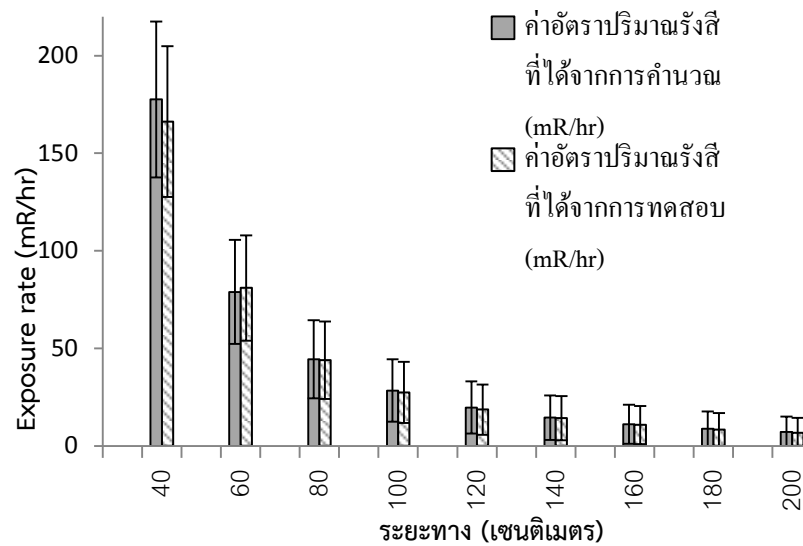
1. จัดอุปกรณ์ทดสอบดังแผนภาพรูปที่ 4.15
2. วัดอัตราปริมาณรังสีจากต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานซีเซียม-137 ความแรงรังสี 68 mCi ทำการวัดที่เวลาคงที่ 30 วินาที และเพิ่มระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับหัววัดรังสีจาก 30 เซนติเมตรถึง 2 เมตร ที่แต่ละระยะห่างจะทำการวัด 3 ครั้งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้

4.6.3 ผลการทดสอบ

1. ข้อมูลผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.5 และจากกราฟเปรียบเทียบความแตกต่างของอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณ และอัตราปริมาณรังสีที่วัดได้จากเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่ามีค่าความแตกต่างไม่เกิน 7 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลผลการทดสอบอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณเทียบกับอัตราปริมาณรังสีที่วัดได้จากเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้นที่ระยะต่างๆ

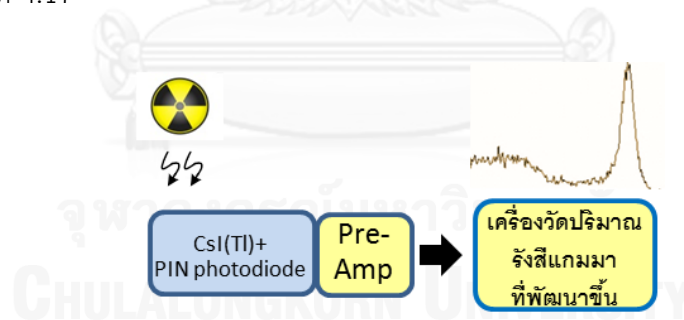
ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี (cm)	ค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณ (mR/hr)	ค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการทดสอบ (mR/hr)
40	177.6	166.20
60	78.9	80.99
80	44.4	44.9
100	28.4	27.38
120	19.7	18.58
140	14.5	14.24
160	11.1	10.71
180	8.8	8.24
200	7.1	6.63



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบ

4.7 การทดสอบการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา ระบุชนิดของไอโซโทป และการเปรียบเทียบพลังงาน

การทดสอบการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา ระบุชนิดของไอโซโทป และการเปรียบเทียบพลังงาน เป็นการทดสอบการทำงานของเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น โดยจัดอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 แผนภาพการจัดอุปกรณ์การทดสอบการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา ระบุชนิดของไอโซโทป และการเปรียบเทียบพลังงาน

4.7.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ต้นกำเนิดรังสีซีซีเอ็ม-137
2. ต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60
3. เครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ทโฟนที่พัฒนาขึ้น

4.7.2 ขั้นตอนการทดสอบ

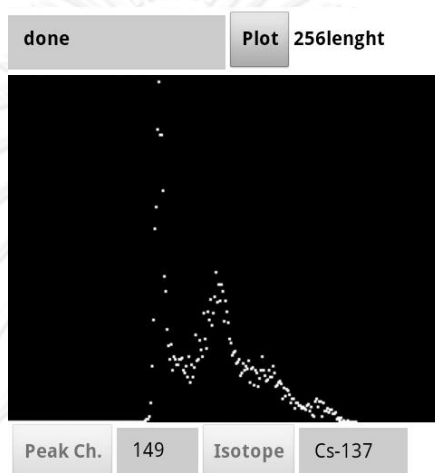
1. จัดอุปกรณ์ทดสอบดังแผนภาพรูปที่ 4.1

2. เริ่มทำการวัดรังสีจากต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 และโคบอลต์-60 จนกระทั่งกระบวนการวัดเสร็จสิ้น จึงทำการบันทึกผลการทดสอบ และนำผลการทดสอบไปสร้างเป็นกราฟเปรียบเทียบพลังงาน (Energy calibration)

3. นำต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 อีกตัวหนึ่งซึ่งไม่ได้ใช้ในการเปรียบเทียบพลังงาน มาทดสอบการระบุชนิดของไอโซโทปรังสี

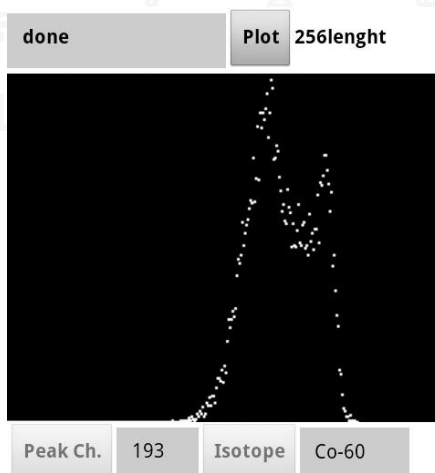
4.7.3 ผลการทดสอบ

1. ผลการทดสอบการวัดรังสีจากต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 พบว่ามีค่าจำนวนนับสูงสุดอยู่ที่ช่องวิเคราะห์ที่ 149 ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบการปรับเทียบพลังงานจากต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137

2. ผลการทดสอบการวัดรังสีจากต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 พบว่ามีค่าพลังงานสูงสุดอยู่ที่ช่องวิเคราะห์ที่ 193 ดังแสดงในรูปที่ 4.19

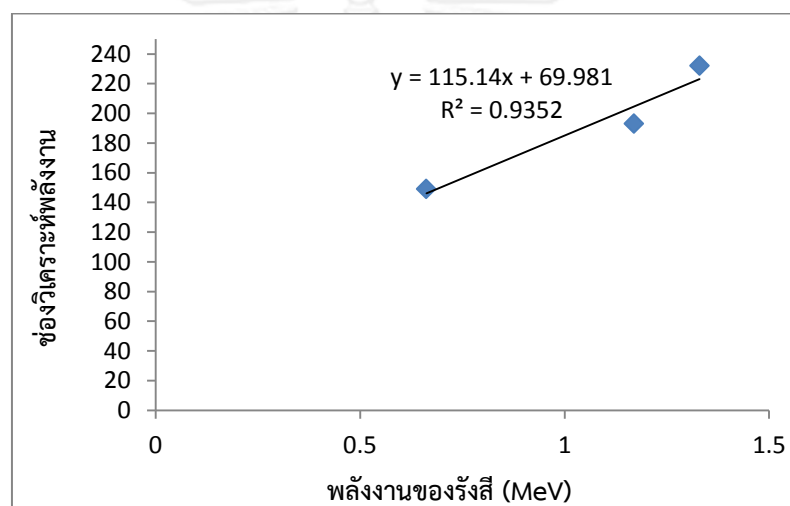


รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบการปรับเทียบพลังงานจากต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60

3. จากผลการทดสอบการวัดรังสีจากต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 และโคบอลต์-60 ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.6 และนำไปสร้างเป็นกราฟเปรียบเทียบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.20

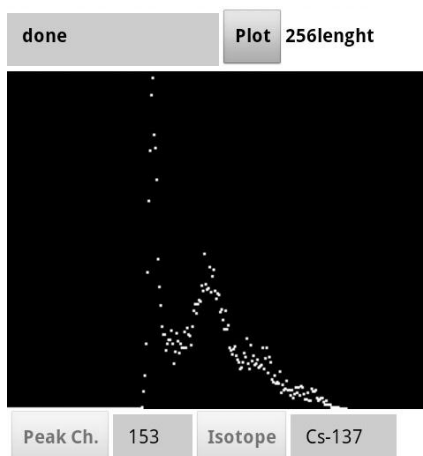
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการวัดรังสีจากต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 และโคบอลต์-60

ไอโซโทปรังสี	พลังงานของรังสี (MeV)	ช่องวิเคราะห์พลังงาน
Cs-137	0.662	149
Co-60	1.17	193
Co-60	1.33	232



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีและช่องวิเคราะห์พลังงาน

4. จากการทดสอบการระบุชนิดของไอโซโทป ได้ใช้ผลการเปรียบเทียบพลังงานของการทดลองในข้างต้นมาช่วยในการคำนวณหาพลังงานของไอโซโทป ทดสอบโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 อีกตัวหนึ่ง พบว่าเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้นสามารถระบุชนิดของไอโซโทปรังสีว่าเป็นซีเซียม-137 ได้อย่างถูกต้อง ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบการระบุชนิดของไอโซโทปรังสีซีเซียม-137

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

เครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ตโฟนที่พัฒนาขึ้นมีขนาดกระทัดรัด สะดวกต่อการใช้งาน มีความละเอียดช่องวิเคราะห์ 256 ช่องวิเคราะห์ ใช้เอดีซีขนาด 8 บิต ในการแปลงค่าความสูงของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข ทำงานร่วมกับสมาร์ตโฟนในการควบคุมการทำงานและแสดงผลการวัดรังสี ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้นสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลการทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าคิกดาต้า

จากการทดสอบวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าคิกดาต้าขนาด ± 12 โวลต์ ที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับ หัววัดรังสี วงจรขยายสัญญาณพัลส์ และวงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแอมป์แอนดไฮลด์ พบว่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าคิกดาต้าแต่ละชุดมีค่าแรงดันกระเพื่อม (Ripple voltage) ประมาณ 5 มิลลิโวลต์ ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่พัฒนาขึ้น และมีค่าแรงดันกระเพื่อมไม่เกิน 10 มิลลิโวลต์ ขณะจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดสูงสุด

5.1.2 ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณพัลส์ส่วนหน้า

วงจรขยายสัญญาณพัลส์ส่วนหน้ามีสัญญาณพัลส์ขนาด 75 มิลลิโวลต์ จากการวัดต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) มีค่าเวลาการสลายตัว (Decay time) ประมาณ 60 ไมโครวินาที และมีความไว 22 mV/MeV

5.1.3 ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณพัลส์

วงจรขยายสัญญาณพัลส์ที่พัฒนาขึ้นมีอัตราการขยายสัญญาณสูงสุด 250 เท่า สามารถสร้างพัลส์แบบ Semi Gaussian ที่มีค่าไทม์ทูปิก 1 μ s และความกว้างพัลส์ขนาด 2 μ s มีความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตราขยายแบบอินทิกรัล 0.04 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงขนาดสัญญาณพัลส์ 0-10 V

5.1.4 ผลการทดสอบวงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแอมป์แอนดไฮลด์

วงจรพีคดีเทคเตอร์พร้อมแอมป์แอนดไฮลด์ที่ใช้ในการตรวจวัด และคงค่าความสูงของสัญญาณพัลส์ เพื่อส่งให้วงจรแปลงค่าความสูงของสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข มีค่าความคลาดเคลื่อนในการตรวจวัดความสูงของสัญญาณพัลส์ไม่เกิน 0.28 เปอร์เซ็นต์ และความเป็นเชิงเส้นของการตรวจวัดความสูงของสัญญาณพัลส์มีค่า $R^2 = 0.9999$

5.1.5 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นในการแปลงผันสัญญาณพัลส์เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข

ค่าความสูงสัญญาณพัลส์ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกพลังงานของรังสี จะถูกแปลงเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขเพื่อนำไปเป็นข้อมูลการกระจายพลังงานของรังสี หรือสเปกตรัมพลังงานของรังสี จากการทดสอบการทำงานในกระบวนการนี้พบว่าความเป็นเชิงเส้นมีค่า $R^2 = 0.9955$

5.1.6 ผลการเปรียบเทียบเครื่องมือวัดรังสีที่พัฒนาขึ้น

จากการเปรียบเทียบเครื่องมือวัดรังสีที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐานซีเซียม-137 เทียบกับค่าอัตราปริมาณรังสีที่คำนวณได้ที่ระยะต่างๆ พบว่ามีค่าความแตกต่างไม่เกิน ± 7 เปอร์เซ็นต์

5.1.7 ผลการทดสอบการแสดงผลสเปกตรัมรังสีแกมมา ระบุชนิดของไอโซโทป และการเปรียบเทียบพลังงาน

จากผลการทดสอบการแสดงผลสเปกตรัมรังสีแกมมา พร้อมทั้งระบุชนิดของไอโซโทปพบว่า สามารถแสดงผลสเปกตรัมของรังสีพร้อมทั้งระบุชนิดของไอโซโทปรังสีได้ผลเป็นที่น่าพอใจ และจากข้อมูลช่องวิเคราะห์พลังงานสูงสุดสามารถสร้างกราฟเปรียบเทียบพลังงานได้เป็นสมการเส้นตรง ดังสมการที่ 5.1

$$y = 115.14x - 69.981 \quad \dots\dots\dots(5.1)$$

ซึ่งความเป็นเชิงเส้นมีค่า $R^2 = 0.9352$ และยังสามารถระบุชนิดของไอโซโทปรังสีได้อย่างถูกต้อง

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

5.2.1 เนื่องจากการพัฒนาเครื่องมือที่มีขนาดเล็กจึงต้องเลือกใช้แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิง (Switching power supply) ทำให้มีสัญญาณรบกวน (Noise) สูงกว่าแหล่งจ่ายไฟแบบลิเนียร์ (Linear power supply) ซึ่งสัญญาณรบกวนนี้เป็นอุปสรรคในการแยกแยะสัญญาณจากการวัดรังสีซึ่งมีขนาดเล็กเช่นกัน

5.2.2 วงจรพีคดิเทคเตอร์พร้อมแชนเนลแอนด์โฮลด์ไม่สามารถตรวจหาความสูงของสัญญาณที่มีขนาดต่ำกว่า 150 มิลลิโวลต์ได้ เป็นผลให้การสร้างสเปกตรัมพลังงานของรังสีในช่วงพลังงานต่ำไม่สมบูรณ์

5.2.3 จำนวนช่องวิเคราะห์พลังงานมีความละเอียดน้อย ทำให้ความสามารถในการแยกแยะพลังงานของรังสีลดลง เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูล และขนาดของหน้าจอดีแสดงผล

5.2.4 ผู้วิจัยขาดเทคนิคและความเชี่ยวชาญในการเขียนโปรแกรม ทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลสเปกตรัมพลังงานรังสีของโปรแกรมทำงานได้ไม่ดีเท่าที่ควร เช่น การสะสมข้อมูลการนับรังสี การแสดงผลสเปกตรัมพลังงานของรังสี การหาตำแหน่งสูงสุดบนสเปกตรัมพลังงาน เป็นต้น

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณรบกวนที่ดีและการกำบังสิ่งรบกวนให้แมงวงจรขยายสัญญาณ จะช่วยเพิ่มอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N) มากขึ้น

5.3.2 พัฒนางจรพีคดิเทคเตอร์พร้อมแชนเนลแอนด์โฮลด์ให้สามารถตรวจหาความสูงของสัญญาณที่มีขนาดต่ำกว่า 150 มิลลิโวลต์ได้ เพื่อให้สามารถสร้างสเปกตรัมพลังงานของรังสีได้อย่างสมบูรณ์

5.3.3 เพิ่มจำนวนช่องวิเคราะห์ให้มีความละเอียดสูงขึ้น เพื่อความละเอียดในการแยกแยะพลังงานของรังสีได้อย่างชัดเจน ทำให้มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์มากยิ่งขึ้น เลือกใช้วิธีการรับ-ส่งข้อมูลที่มีความรวดเร็วยิ่งขึ้น และพัฒนาวิธีการแสดงผลบนหน้าจอดีที่มีความจำกั

5.3.4 พัฒนาเทคนิคการเขียนโปรแกรมให้เกิดความเชี่ยวชาญ จะช่วยให้การพัฒนาโปรแกรมในการวิเคราะห์ข้อมูลรังสีมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

1. อรรถพร ภัทรสุมันต์, เอกสารการสอนวิชา 2111609 การวัดปริมาณรังสี. ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
2. วิรุพห์ มังคละวีรัช และ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, อุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง. รายงานโครงการสิ่งประดิษฐ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
3. João M. Cardoso, et al., A Very Low-Cost Portable Multichannel Analyzer. Instrumentation Center of the Physics Department. 2000. 516: p. 3004.
4. อภิรักษ์ ลอยแก้ว, การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาบนพ็อกเก็ตพีซี. 2547, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
5. กมลทิพย์ พลอยกระจ่าง, เครื่องวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาที่ทำงานบนพ็อกเก็ตพีซีโดยใช้ไปป์ไลน์เอดีซี. 2551, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
6. Goncharenko, Y. Gamma Sapiens intellectual gamma radiation detector. Available from: <http://lplaces.com/en/dosimeter/16-devices/183-gamma-sapiens> (Retrieved April 26th, 2014).
7. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, เอกสารการสอนวิชา 2111606 การตรวจวัดรังสีนิวเคลียร์และอุปกรณ์นิวเคลียร์. 2538: ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
8. คณะผู้จัดทำเอกสาร สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, การป้องกันอันตรายจากรังสี ระดับ 1. เอกสารการอบรมการป้องกันอันตรายจากรังสี ระดับ 1. 2548: สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
9. สันทนา สงครินทร์, เอกสารประกอบการสอน วิชาช่างไมโครคอนโทรลเลอร์ 1105-5203. 2548, วิทยาลัยสารพัดช่างอุดรธานี.
10. สันทบ บัวแก้ว and กองบรรณาธิการ. เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายบลูทูท. Available from: http://www.thaitelecomkm.org/TTE/topic/attach/Bluetooth_Technology/index.php (Retrieved April 10th, 2014).
11. 9M/Webmaster@sourcecode.in.th. บทที่ 1 รู้จักกับแอนดรอยด์. Available from: <http://www.sourcecode.in.th/articles.php?id=71> (Retrieved April 9th, 2014).



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพล้ง วัฒนพานิช เกิดวันที่ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2529 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตจากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2551 และในปีการศึกษา 2553 ได้เข้าศึกษา ระดับปริญญาโทบัณฑิตที่ภาควิชาวิศวกรรมนิเวศลิยร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY