

การพัฒนาอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีแบบพกพา



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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A PORTABLE ISOTOPES IDENTIFIER DEVICE

Mr. Weerawat Pornroongruengchok



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

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีแบบพกพา
โดย	นายวีระวัฒน์ พรุ่งเรืองโชค
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ เดโช ทองอร่าม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ เดโช ทองอร่าม)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ รัตมี)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

วีระวัฒน์ พรุ่งเรืองโชค : การพัฒนาอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีแบบพกพา (DEVELOPMENT OF A PORTABLE ISOTOPES IDENTIFIER DEVICE) อ.ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: อ. เดโช ทองอร่าม, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, 117 หน้า.

อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีแบบพกพานี้ พัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นเครื่องมือวัดทางนิวเคลียร์ที่สามารถระบุชนิดของไอโซโทปรังสีจากการวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาจากวัสดุกัมมันตรังสีใดๆ การออกแบบและสร้างเลือกใช้วัสดุที่หาได้ภายในประเทศเป็นหลัก เพื่อให้ง่ายต่อการบำรุงรักษา ระบบวัดรังสีเพื่อวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานประกอบด้วย หัววัดเรืองรังสีชนิดผลึกซีเซียมไอโอไดด์เจือสารทลเลียมขนาด 10×10 มม.² ประกบกับโฟโตไดโอดชนิดพิน เชื่อมต่อกับวงจรขยายส่วนหน้าแบบไวประจุที่มีความไว 22 มิลลิโวลต์/เมกาอิเล็กตรอนโวลต์ สัญญาณพัลส์จากระบบวัดส่วนหน้าจะได้รับการขยายสัญญาณด้วยวงจรขยายสัญญาณพัลส์ และส่งต่อให้วงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยวที่ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ สัญญาณลอจิกที่ถูกคัดเลือกจะส่งเข้าวงจรเรทมิเตอร์เพื่อเปลี่ยนอัตรานับรังสีเป็นแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย เมื่อเสร็จสิ้นการวัดระบบจะแสดงสเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาบนหน้าจอแสดงผลแอลซีดีขนาด 4.3 นิ้ว หลังการเปรียบเทียบพลังงาน ระบบสามารถระบุชนิดไอโซโทปด้วยโปรแกรมการค้นหาในฐานข้อมูลพลังงานไอโซโทปที่บันทึกไว้ เมื่อเลื่อนตัวชี้ตำแหน่งไปที่บริเวณจุดกึ่งกลางของพีค ± 21 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

ผลทดสอบการทำงานพบว่าอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดสเปกตรัมของไอโซโทปรังสี โคบอลต์-57 พลังงาน 122 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซีเซียม-137 พลังงาน 662 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และ โคบอลต์-60 พลังงาน 1,173 และ 1,332 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ได้เป็นที่น่าพอใจและเมื่อเลื่อนตัวชี้ตำแหน่งไปจุดกึ่งกลางของพีคสามารถระบุชนิดไอโซโทปรังสีได้อย่างถูกต้อง ซึ่งใช้เวลาในการวัดครั้ง ละ 92 วินาที

ภาควิชา วิศวกรรมนิวเคลียร์

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5670389621 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS: GAMMA RADIATION / RADIOISOTOPE IDENTIFIER DEVICE / NUCLEAR INSTRUMENT

WEERAWAT PORNROONGRUENGCHOK: DEVELOPMENT OF A PORTABLE ISOTOPES IDENTIFIER DEVICE. ADVISOR: DECHO THONG-ARAM, CO-ADVISOR: ASST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA, 117 pp.

A portable Radioisotope Identifier Device (RIID) was developed as a nuclear instrument for radioisotopes identification by analyzing the energy spectrum of gamma emitted from radioactive materials. The design and construction were mainly used local available components and materials for ease of maintenance. This gamma spectroscopic system consisted of a $10 \times 10 \text{ mm}^2$ CsI (Tl) crystal coupled with PIN photodiode detector in conjunction with 22 mV/MeV charge sensitive preamplifier. The measured pulse output from the front-end stage was fed to a pulse amplifier circuit. Amplified signal was then sent to a single channel analyzer circuit which was controlled by a microcontroller. The differential discriminated logic was coupled with a ratemeter circuit in order to convert the count rate to the average voltage signal. The gamma analyzed spectrum was displayed on the 4.3 inches LCD display screen. After energy calibration, isotope identification could be performed by the search library program by moving cursor was along the mid photopeak location in range of $\pm 21 \text{ keV}$.

The measurement results indicated that the gamma energy spectrum of Co-57 (122 keV), Cs-137 (662 keV) and Co-60 (1173 keV and 1332 keV) could be measured satisfactory and all these three radioisotopes were correctly identified. The total measurement time was 92 second.

Department: Nuclear Engineering

Field of Study: Nuclear Technology

Academic Year: 2016

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

กระผมขอขอบพระคุณอาจารย์เดโช ทองอร่าม ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และดร.กมลทิพย์ พลอยกระจ่าง ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน จนทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากไม่มีบุคคลทั้งสามท่านคอยสั่งสอนงานวิจัยชิ้นนี้ คงไม่สำเร็จ กระผมขอขอบพระคุณอย่างสุดซึ้ง

ขอขอบพระคุณศูนย์เชี่ยวชาญนิวเคลียร์เทคโนโลยี สำหรับวิเคราะห์และทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เปรียบเสมือนบ้านหลังที่ 2 เป็นสถานที่ในการทำวิจัย อีกทั้งพักผ่อนกายและใจ

ขอขอบพระคุณราชกรีฑาสโมสร สำหรับทุนอุดหนุนการศึกษา

ขอขอบพระคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นกำลังใจให้กันและกัน

ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ คุณตา คุณยาย และญาติพี่น้องทุกคน ที่เป็นแรงใจ และให้โอกาสผมได้ศึกษาต่อตามที่ผมตั้งใจไว้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ธาตุกัมมันตรังสี.....	5
2.2 การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี.....	7
2.3 อันตรกิริยาของรังสีแกมมา.....	8
2.4 การป้องกันอันตรายจากรังสี	12
2.4.1 องค์การที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันอันตรายจากรังสี	12
2.4.2 หลักการป้องกันอันตรายจากรังสี.....	13
2.4.3 การป้องกันอันตรายทางรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสี	15
2.5 เครื่องมือวัดรังสี	18

2.5.1 การตรวจวัดรังสี.....	20
2.5.1.1 หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน.....	20
2.5.1.2 โฟโตไดโอดชนิดพิน.....	22
2.5.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา.....	22
2.5.2.1 ระบบวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยว (Single Channel Analyzer).....	23
2.6 อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี.....	27
2.6.1 การทำงานของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี.....	28
2.6.2 หัววัดรังสีสำหรับอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี.....	28
2.6.3 โครงสร้างของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี.....	29
2.6.4 ข้อกำหนดของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี.....	30
2.7 ความเสียหายทางนิวเคลียร์และมาตรฐานของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทป.....	30
2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller).....	34
2.9 การแสดงสเปกตรัมและระบุชนิดไอโซโทปรังสี.....	39
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	42
3.1 ข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทป.....	42
3.1.1 ข้อมูลพื้นฐานของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทป.....	42
3.1.2 ข้อมูลพื้นฐานสำหรับระบบวัดส่วนหน้า.....	43
3.1.3 ข้อมูลพื้นฐานสำหรับส่วนประมวลผลและแสดงผล.....	43
3.2 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี.....	44
3.2.1 การคัดเลือกช่วงพลังงานของต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่สามารถระบุชนิดไอโซโทปรังสี ได้.....	44
3.2.2 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้า.....	44
3.2.3 วงจรขยายสัญญาณพัลส์ (Pulse Amplifier).....	45

3.2.4	วงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยว (Single channel analyzer).....	48
3.2.5	วงจรเรตมิเตอร์และวงจรขยายแรงดันไฟฟ้า.....	51
3.2.6	ส่วนแสดงผลและโปรแกรม.....	53
3.2.7	การประกอบอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้น.....	57
บทที่ 4	การทดสอบสมรรถนะของระบบ.....	60
4.1	การทดสอบหัววัดรังสี.....	60
4.2	การทดสอบวงจรขยายสัญญาณพัลส์.....	62
4.2	การทดสอบวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยว.....	71
4.3.1	การทดสอบขนาดช่องวิเคราะห์สัญญาณ.....	75
4.5	การทดสอบวงจรเรตมิเตอร์และวงจรขยายแรงดันไฟฟ้า.....	79
4.6	การทดสอบอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้น.....	83
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย.....	87
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	87
5.2	คุณลักษณะของเครื่องมือ.....	88
5.3	ปัญหาและอุปสรรค.....	88
5.4	ข้อเสนอแนะ.....	89
	รายการอ้างอิง.....	90
	ภาคผนวก.....	92
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	117

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติพื้นฐานของรังสีแอลฟา บีตา และแกมมา.....	6
ตารางที่ 2.2 ขีดจำกัดปริมาณรังสีที่ ICRP เสนอแนะใน Publication ฉบับที่ 103.....	15
ตารางที่ 2.3 อัตราปริมาณรังสีแกมมาของไอโซโทปที่มีกัมมันตภาพ 10 MBq ที่ระยะ 1 เมตร.....	17
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรถายสัญญาณที่อัตราขยาย 50.....	66
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรถายสัญญาณที่อัตราขยาย 170.....	66
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรถายสัญญาณที่อัตราขยาย 200.....	67
ตารางที่ 4.4 ความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตราการขยายแบบอินทิกรัลที่อัตราขยาย 50, 170 และ 200 เท่า.....	70
ตารางที่ 4.5 ผลทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง LLD.....	73
ตารางที่ 4.6 ผลทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ULD.....	74
ตารางที่ 4.7 เวลาที่ใช้ในการสแกนเมื่อขนาด window ต่างกัน.....	75
ตารางที่ 4.8 ระดับ LLD, ULD และ Window จาก SCA.....	78
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรถายสัญญาณและวงจรถายแรงดันไฟฟ้า ในช่วงความถี่ X1 และ X10.....	80
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรถายสัญญาณและวงจรถายแรงดันไฟฟ้า ในช่วงความถี่ X100 และ X1000.....	81

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนผังการสลายตัวของ Co-60 และ Cs-137	8
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการเกิดโฟโตอิเล็กทริก.....	9
รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการกระเจิงคอมป์ตัน	10
รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการแผ่โปรตักซัน	11
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขอะตอม พลังงานของรังสีแกมมา และอันตรกิริยาทั้งสาม	11
รูปที่ 2.6 ชนิดของรังสีซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงต่างกัน	18
รูปที่ 2.7 ก. เครื่องสำรวจความเปราะเปื้อนทางรังสีแบบพกพา	19
รูปที่ 2.8 การเปล่งแสงของผลึกสารอินทรีย์	20
รูปที่ 2.9 สเปกตรัมของ NaI (TI), CsI (TI), BGO กับการตอบสนองความยาวคลื่นแสงของซิลิกอนฟิโนโฟโตไดโอด.....	21
รูปที่ 2.10 ภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิดพิน	22
รูปที่ 2.11 การเกิดลอจิกพัลส์ของอินทิเกรตดิสคริมิเนเตอร์	24
รูปที่ 2.12 การเกิดสัญญาณลอจิกพัลส์ของระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบช่องเดี่ยว	24
รูปที่ 2.13 ระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบช่องเดี่ยวแบบนอนไม้มิง SCA	25
รูปที่ 2.14 การทำงานของระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบช่องเดี่ยวแบบโหมดสวีพ.....	27
รูปที่ 2.15 สเปกตรัมพลังงานของซีเซียม-137 และ โคบอลต์-60 ที่วัดด้วยหัววัดรังสีชนิด NaI (TI) .	27
รูปที่ 2.16 อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีหัววัดชนิดต่าง ๆ.....	29
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการแสดงผลของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี.....	34
รูปที่ 2.18 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ChipKIT UNO32	38
รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของอุปกรณ์วิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง	39
รูปที่ 2.20 Algorithm ของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปที่ Michael T. Batdorf et al. พัฒนาขึ้น	41

รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์ระบุชนิดของไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้น.....	42
รูปที่ 3.2 หัวต่อ DB9 ตัวผู้ของหัววัดรังสีซึ่งต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ขนาดแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ.....	43
รูปที่ 3.3 แผนภาพการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าวงจรต่าง ๆ จากแบตเตอรี่.....	45
รูปที่ 3.4 แผนภาพการทำงานของวงจรถยายสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่พัฒนาขึ้น	46
รูปที่ 3.5 วงจรถยายสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่พัฒนาขึ้น	48
รูปที่ 3.6 แผ่นพิมพ์วงจรถยายสัญญาณ	48
รูปที่ 3.7 แผนภาพการทำงานของวงจรวเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยว.....	49
รูปที่ 3.8 วงจรวเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยวที่พัฒนาขึ้น.....	50
รูปที่ 3.9 แผ่นพิมพ์วงจรวเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยวที่พัฒนาขึ้น.....	51
รูปที่ 3.10 แผนภาพการทำงานของวงจรถ่ายสัญญาณร่วมกับวงจรถยายแรงดันไฟฟ้า	51
รูปที่ 3.11 วงจรถ่ายสัญญาณ	52
รูปที่ 3.12 วงจรถยายแรงดันไฟฟ้า.....	53
รูปที่ 3.13 แผนผังการทำงานของโปรแกรมในอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้น	55
รูปที่ 3.14 แผนผังการทำงานของโปรแกรมในอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้น (ต่อ).....	56
รูปที่ 3.15 แผนผังการทำงานของโปรแกรมในอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้น (ต่อ).....	57
รูปที่ 3.16 อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปที่พัฒนาขึ้น.....	58
รูปที่ 3.17 อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปที่พัฒนาขึ้นฝั่งจอแสดงผลพร้อมแสดงปุ่มกด	58
รูปที่ 3.18 ภายในอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้นฝั่งจอแสดงผล	59
รูปที่ 3.19 ภายในอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้นฝั่งหัววัดรังสี.....	59
รูปที่ 4.1 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบหัววัดรังสี.....	60
รูปที่ 4.2 สัญญาณพัลส์นิวเคลียร์จากหัววัดรังสีชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI (TL) ประกอบกับโพโตไดโอดชนิดพินผ่านวงจรถยายส่วนหน้าเมื่อทำการวัดรังสีแกมมาจากสารรังสีมาตรฐานซีเซียม-137.....	61

รูปที่ 4.3 สัญญาณพัลส์นิวเคลียร์จากหัววัดรังสีชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI (TI) ประกอบกับโฟโตไดโอดชนิดพินผ่านวงจรถายส่วนหน้าเมื่อทำการวัดรังสีแกมมาจากสารรังสีมาตรฐานโคบอลต์-60	62
รูปที่ 4.4 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบสมรรถนะของวงจรถายสัญญาณพัลส์.....	62
รูปที่ 4.5 สัญญาณจากวงจรถายสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่พัฒนาขึ้นเมื่อทดสอบกับสารรังสีมาตรฐานซีเซียม-137 และโคบอลต์-60.....	64
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของซีเซียม-137และโคบอลต์-60 จากอุปกรณ์วิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่องหลังจากปรับเทียบอัตราขยายสัญญาณ	65
รูปที่ 4.7 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรถายสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่พัฒนาขึ้นขนาด 5 โวลต์.....	65
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตที่อัตราขยาย 50 เท่า	67
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตที่อัตราขยาย 170 เท่า	68
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตที่อัตราขยาย 200 เท่า.....	68
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและอัตราขยายสัญญาณ 50 เท่า.....	69
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและอัตราขยายสัญญาณ 170 เท่า	69
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและอัตราขยายสัญญาณ 200 เท่า	70
รูปที่ 4.14 การจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดียวที่พัฒนาขึ้น.....	71
รูปที่ 4.15 รูปสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดียวที่พัฒนาขึ้น.....	72
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง LLD และ ช่องวิเคราะห์สัญญาณกับความสูงของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์	73
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ULD และ ช่องวิเคราะห์สัญญาณกับความสูงของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์	74
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมของสารรังสีซีเซียม-137 ที่สเตรปเท่ากับ 10 และใช้เวลา 1 วินาที.....	76
รูปที่ 4.19 สเปกตรัมของสารรังสีซีเซียม-137 ที่สเตรปเท่ากับ 11 และใช้เวลา 1 วินาที.....	76
รูปที่ 4.20 สเปกตรัมของสารรังสีโคบอลต์-60 ที่สเตรปเท่ากับ 12 และใช้เวลา 1 วินาที	77

รูปที่ 4.21 สเปกตรัมของสารรังสีโคบอลต์-60 ที่สเตรปเท่ากับ 15 และใช้เวลา 1 วินาที	77
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง window กับ LLD เมื่อระดับ LLD เปลี่ยนไป	78
รูปที่ 4.23 แผนภาพการจับอุปกรณ์ทดสอบวงจรถมิตเตอร์และวงจรถยายแรงดันไฟฟ้า	79
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าจากเรตมิเตอร์ในช่วง Range x1 และ x10	81
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าจากเรตมิเตอร์ในช่วง Range x100 และ x1000.....	82
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าจากวงจรถยายแรงดันไฟฟ้าในช่วง Range x1 และ x10.....	82
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าจากวงจรถยายแรงดันไฟฟ้าในช่วง Range x100 และ x1000.....	83
รูปที่ 4.28 หน้าจอแสดงหลังจากเปิดเครื่อง	84
รูปที่ 4.29 หน้าเมนูหลักของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้น	84
รูปที่ 4.30 สเปกตรัมรังสีแกมมาของโคบอลต์-57	85
รูปที่ 4.31 สเปกตรัมรังสีแกมมาของซีเซียม-137	85
รูปที่ 4.32 สเปกตรัมรังสีแกมมาของโคบอลต์-60	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รังสีแกมมาเป็นกัมมันตภาพรังสี (Radioactivity) ที่เกิดจากผลการสลายตัวของธาตุที่เป็นไอโซโทปรังสี (Radioisotope Elements) ซึ่งมีสถานะความไม่เสถียรภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุ ในปัจจุบันนานาชาติมีการใช้ประโยชน์จากสารกัมมันตรังสี (Radioactive Material) อย่างแพร่หลาย ทั้งในงานด้านการแพทย์ อุตสาหกรรม เกษตร สิ่งแวดล้อม และการศึกษาวิจัย เป็นต้น ประเทศไทยก็เช่นเดียวกัน มีการใช้ประโยชน์จากสารกัมมันตรังสีทั้งในหน่วยงานภาครัฐและเอกชน โรงพยาบาล สถาบันวิจัย สถาบันการศึกษา การใช้ประโยชน์จากรังสีเป็นกลไกหนึ่งซึ่งช่วยส่งเสริมการพัฒนาด้านเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์ดังกล่าวจำเป็นต้องมีการกำกับดูแล ควบคุม ใช้ความรู้ความเข้าใจ และคำนึงถึงความปลอดภัยทางรังสีของผู้ปฏิบัติงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือชุมชนเป็นหลัก ต้องมีการควบคุมให้ระดับปริมาณรังสีในบริเวณปฏิบัติงานและพื้นที่ควบคุมไม่เกินเกณฑ์ความปลอดภัย นอกจากนี้ผู้ปฏิบัติงานและเพื่อนร่วมงานจะต้องได้รับปริมาณรังสีน้อยที่สุดเท่าที่จะควบคุมได้ จึงจำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์และเครื่องมือวัดรังสีในการตรวจวัดเพื่อที่จะทำให้ผู้ปฏิบัติงานได้ทราบถึงปริมาณรังสีที่ได้รับและประเมินได้ว่ามีความปลอดภัยทางรังสีมากน้อยเพียงใด โดยทั่วไปอุปกรณ์และเครื่องมือวัดรังสีส่วนใหญ่ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ มีราคาแพง อาจเป็นเรื่องยากสำหรับผู้ปฏิบัติงานในการจัดหาและบำรุงรักษา ปัจจุบันนอกจากเครื่องมือวัดปริมาณรังสีที่ใช้ในงานด้านความปลอดภัยในบริเวณปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อมแล้วนั้น ยังมีเครื่องมือวัดรังสีที่ออกแบบเพื่อการใช้งานด้านการตรวจวัดรังสีซึ่งสามารถวัดได้ทั้งระดับปริมาณรังสี วิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานและระบุชนิดของไอโซโทปรังสี ณ สถานที่ตรวจวัดได้ทันที

อุปกรณ์หรือเครื่องมือวัดรังสีรุ่นเก่าที่สามารถระบุชนิดของไอโซโทปรังสีได้มักจะเป็นเครื่องวัดประเภทแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ซึ่งมีขนาดใหญ่ ใช้เนื้อที่ในการติดตั้งมากและไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ ปัจจุบันอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ออกแบบให้เหมาะสมสำหรับผู้ปฏิบัติงานภาคสนาม สามารถพกพาได้ ใช้งานง่ายและสะดวกต่อผู้ใช้งาน แต่มีราคาและค่าบำรุงรักษาสูงมาก จากเหตุผลดังกล่าวจึงเกิดแนวคิดในการพัฒนาอุปกรณ์หรือเครื่องมือวัดรังสีที่มีราคาถูกลง ง่ายต่อการใช้งานและมีประสิทธิภาพที่ดี โดยอาศัยวัสดุและชิ้นส่วนประกอบที่สามารถหาได้ในประเทศ และจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะออกแบบและสร้างอุปกรณ์ดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ระบุไอโซโทปรังสีแบบพกพา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ ของอุปกรณ์จำแนกไอโซโทปรังสี ซึ่งประกอบด้วย วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า วงจรขยายสัญญาณ วงจรหัววัดรังสีชนิด CsI (TI) ประกอบกับโฟโตไดโอดชนิดพิน วงจรวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณแบบช่องเดี่ยว และส่วนเชื่อมโยงสัญญาณกับจอแสดงผล
2. พัฒนาโปรแกรมที่ใช้ควบคุม แสดงผลสเปกตรัมรังสีแกมมาและระบุชนิดของไอโซโทปรังสี
3. ทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบ เช่น การวิเคราะห์สเปกตรัมของ Co-57, Cs-137 และ Co-60 เพื่อการเปรียบเทียบและระบุชนิดของไอโซโทปบางชนิด

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบและสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ ของอุปกรณ์จำแนกไอโซโทปรังสี ประกอบด้วย วงจรหัววัดรังสี วงจรขยายสัญญาณ วงจรวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณพัลส์แบบช่องเดี่ยว
3. พัฒนาโปรแกรมที่ใช้ควบคุม แสดงผลสเปกตรัมรังสีแกมมาและระบุชนิดของไอโซโทปรังสี
4. ทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบ
5. สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้อุปกรณ์สำหรับระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่สะดวกต่อการใช้งาน ลดการนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศ และใช้ประโยชน์ในด้านการวัดรังสีและการเรียนการสอน

1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปี 2554 ปิยเทพ ชอบทำกิจ , เดโซ ทองอร่าม และ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ ทำการพัฒนาเกมมาสเปกโตรมิเตอร์โดยใช้เครื่องเล่นแบบพกพา โดยได้ออกแบบระบบให้สามารถเลือกโหมดการทำงานได้ทั้งโหมดวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาพร้อมแสดงผลสเปกตรัมพลังงานและโหมดวัดอัตราปริมาณรังสีแบบเครื่องสำรวจรังสี มีความสามารถแจกแจงพลังงาน 12.9% ที่พลังงานรังสีแกมมา 662 keV

ของ Cs-137 และในโหมดวัดอัตราปริมาณรังสีสามารถวัดอัตรานับรังสีได้สูงสุด 10 kcps และวัดอัตราเอกโพเซอร์ที่ย่านวัด $\times 1$, $\times 0.1$ และ $\times 0.01$ มีความคลาดเคลื่อน 5.1%, 3.9% และ 4.7% ตามลำดับ

2. ปี 2556 พลัง วัฒนพานิช, เดโซ ทองอร่าม และ อรรถพร ภัทรสมันต์ ทำการพัฒนาเครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาที่ทำงานร่วมกับสมาร์ตโฟน โดยมีอัตราการนับรังสีสูงสุดที่ 10 kcps สามารถวัดอัตราปริมาณรังสีได้ในช่วง 0 – 300 mR/hr ผลการทดสอบการวัดอัตราปริมาณรังสีจากต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานซีเซียม-137 พบว่ามีค่าแตกต่างจากค่ามาตรฐานไม่เกิน $\pm 7\%$ และยังสามารถแสดงสเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาพร้อมทั้งระบุชนิดของไอโซโทปได้เป็นที่น่าพอใจ

3. ปี 2547 สิริยาภรณ์ แสงอรุณ, เดโซ ทองอร่าม และ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ ทำการพัฒนาระบบมอนิเตอร์รังสีแกมมาชนิดเคลื่อนย้ายได้ที่เชื่อมโยงด้วยจีพีเอส ซึ่งระบบสามารถแสดงผลในรูปแบบของสเปกตรัมพลังงาน ความแรงรังสี พร้อมทั้งตำแหน่งพิกัดของเส้นรังและเส้นแวง โดยอาศัยการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับคอมพิวเตอร์ขนาดพกพาชนิดปาล์ม มีค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดที่วัดได้จากตำแหน่งอ้างอิงเป็น $+1.69\text{ mE}$, -1.63 mN ในระบบพิกัด UTM

4. ปี 2552 Kwang Hyun Kim, In Sub Jun และ Ho-Sik Yoo ได้พัฒนาระบบมอนิเตอร์วัดรังสีแกมมาที่มีราคาถูก เพื่อใช้ในงานด้านความปลอดภัยสำหรับวัสดุนิวเคลียร์ โดยใช้หัววัด CsI (TI) ประกอบกับ โฟโตไดโอดชนิดพิน ขนาด 1×1 ซม. ทำงานร่วมกับ DAS with low-noise preamplifier, shaping amplifier, discriminator และ multi control unit (MCU) โดยข้อมูลจะถูกส่งผ่านสัญญาณไวลเลส ที่ความถี่ 400 MHz

5. ปี 2547 อภิรักษ์ ลอยแก้ว และ อรรถพร ภัทรสมันต์ ได้พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาบนพีคเก็ตพีซีสำหรับวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมาที่ได้จากการวัดโดยใช้หัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง สามารถรับข้อมูลสเปกตรัมจากเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่องของ Canberra Series 35 Plus และ 10 Plus ได้โดยตรงหรืออ่านข้อมูลสเปกตรัมที่บันทึกไว้ในหน่วยความจำบนพีคเก็ตพีซีหรือการ์ดความจำแล้วแสดงสเปกตรัมบนหน้าจอของพีคเก็ตพีซี โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถหาจุดกึ่งกลางพีก หาจำนวนนับรวมของพีก หาพื้นที่สุทธิใต้พีก ประมาณค่าความกว้าง ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความสูงพีก หาพลังงานของพีก รวมทั้งการเปรียบเทียบพลังงานและการระบุชนิดของไอโซโทป

6. ปี 2547 L. Pibida, M. Unterweger, และ L. R. Karam ได้ทำการทดสอบเครื่องระบุชนิดไอโซโทปรังสีจำนวน 4 ของบริษัทที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ ตามมาตรฐานของ American National Standards Institute (ANSI) ใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน 11 ชนิดในการทดสอบ ได้แก่ Co-57, Co-60, Cd-109, I-125, Ba-133, Cs-137, Eu-152, Bi-207, Th-228, Pu-239, และ Natural Uranium พบว่ามีข้อผิดพลาดอยู่ที่ 47% โดยมีสาเหตุจาก

- ไม่สามารถระบุชนิดไอโซโทปได้กรณีที่มีปริมาณรังสีในธรรมชาติ (ระดับK-40) มาก
- ต้นกำเนิดรังสีที่ทำการทดสอบไม่มีอยู่ใน library
- สเปกตรัมที่ได้มีค่าทางสถิติไม่เพียงพอที่จะระบุชนิดไอโซโทปได้



บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ธาตุกัมมันตรังสี

เมื่อปี ค.ศ. 1896 หรือ พ.ศ. 2439 อองตวน อองรี แบ็กเกอแรล (Antoine Henri Becquerel) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ได้ค้นพบว่าเมื่อเก็บแผ่นฟิล์มถ่ายรูปที่หุ้มด้วยกระดาษสีดำไว้กับสารประกอบของเกลือยูเรเนียม ฟิล์มจะมีลักษณะเหมือนถูกแสง และเมื่อทำการทดลองกับสารประกอบของยูเรเนียมชนิดอื่น ๆ ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน จึงสรุปว่าน่าจะมีรังสีแผ่ออกมาจากธาตุยูเรเนียมต่อมา ปีแอร์ กูว์รี (Pierre Curie) และมารี กูว์รี (Marie Curie) ได้ค้นพบว่าธาตุพอลอเนียม เรเดียม และทอเรียม ก็สามารถแผ่รังสีได้เช่นเดียวกัน ปรากฏการณ์แผ่รังสีนี้เกิดขึ้นเอง (spontaneous) ไม่ขึ้นกับปัจจัยสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน เรียกปรากฏการณ์ที่ธาตุแผ่รังสีได้เองอย่างต่อเนื่องเช่นนี้ว่า **กัมมันตภาพรังสี** ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของไอโซโทปที่ไม่เสถียรและเรียกธาตุที่มีสมบัติเช่นนี้ว่า **ธาตุกัมมันตรังสี** ต่อมารัทเทอร์ฟอร์ด (Rutherford) ได้ศึกษาเพิ่มเติมและแสดงให้เห็นว่ารังสีที่แผ่ออกมาจากธาตุกัมมันตรังสีอาจเป็นรังสีแอลฟา บีตาหรือแกมมา [1] ที่มีสมบัติแตกต่างกันดัง ตารางที่ 2.1



ตารางที่ 2.1 สมบัติพื้นฐานของรังสีแอลฟา บีตา และแกมมา

ชนิดของรังสี	สัญลักษณ์	สมบัติพื้นฐาน
แอลฟา	α หรือ ${}^4_2\text{He}$	เป็นอนุภาคที่ประกอบด้วยโปรตอนและนิวตรอนอย่างละ 2 อนุภาค มีประจุไฟฟ้า +2 มีเลขมวล 4 มีอำนาจทะลุทะลวงต่ำมาก ไม่สามารถผ่านแผ่นกระดาษหรือโลหะบาง ๆ ได้ เบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้าโดยเบนเข้าหาขั้วลบ
บีตา	β หรือ 0_1e	เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า -1 มีมวลเท่ากับมวลของอิเล็กตรอน มีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่ารังสีแอลฟาถึง 100 เท่า รังสีบีตาพลังงานสูงสามารถผ่านแผ่นโลหะบาง ๆ เช่น แผ่นตะกั่วหนา 1 mm หรือแผ่นอะลูมิเนียมหนา 5 mm มีความเร็วใกล้เคียงความเร็วแสง เบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้าโดยเบนเข้าหาขั้วบวก
แกมมา	γ	เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก ไม่มีประจุและไม่มีมวล เคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง มีความสามารถทะลุทะลวงสูงมากสามารถทะลุผ่านแผ่นตะกั่วหนา 8 mm หรือผ่านแผ่นคอนกรีตหนา ๆ ได้ ไม่เบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้า

นอกจากนี้ยังมีรังสีชนิดอื่น ๆ ที่มีสมบัติแตกต่างกันไป เช่น

- โพสิตรอน (β^+) สัญลักษณ์คือ 0_1e
- โปรตอน (p) สัญลักษณ์คือ ${}^1_1\text{H}$
- ดิวเทอรอน (D) สัญลักษณ์คือ ${}^2_1\text{H}$
- ทริทอน (T) สัญลักษณ์คือ ${}^3_1\text{H}$
- นิวตรอน (n) สัญลักษณ์คือ 1_0n

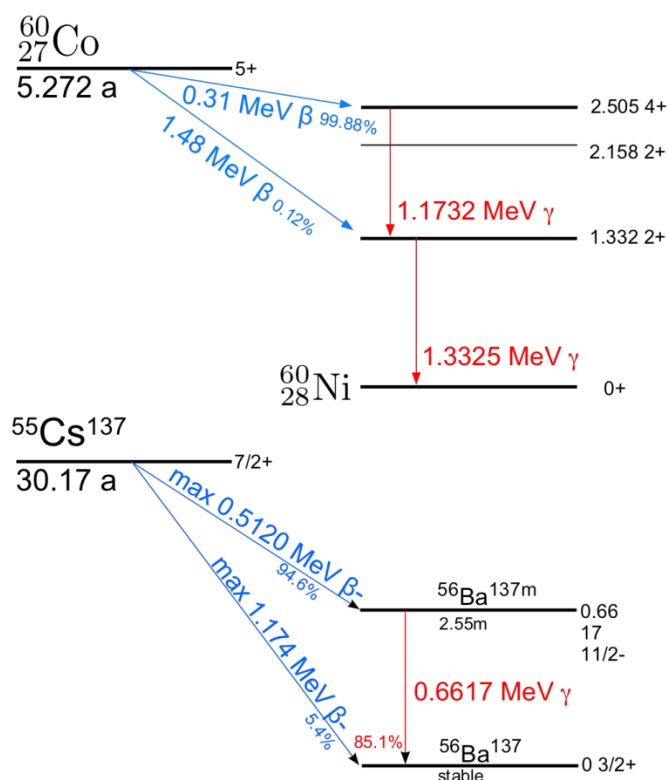
แต่ในธรรมชาติเราจะมีโอกาสพบการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี ที่มีการแผ่รังสี รังสีแอลฟา บีตา และแกมมาเท่านั้น และในการตรวจวัดเพื่อสำรวจรังสี จะอาศัยคุณสมบัติพื้นฐานของรังสีแกมมาที่สามารถตรวจวัดได้ในระยะไกล

2.2 การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี

การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีเป็นการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสเพื่อปรับสมดุลสู่ภาวะเสถียรของธาตุกัมมันตรังสี (Nuclear transformation) โดยการปลดปล่อยรังสีแอลฟาหรือรังสีบีตาเลอะของตอมที่เปลี่ยนแปลงทำให้เกิดธาตุใหม่ขึ้น หลังจากการสลายตัวให้รังสีแอลฟาหรือรังสีบีตาแล้วหากระดับพลังงานของนิวเคลียสยังไม่ลงสู่ระดับพื้น (Ground level) จะมีการลดระดับพลังงานโดยปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอนเป็นการแผ่รังสีแกมมา ช่วงเวลาการสลายให้รังสีแกมมานั้นน้อยกว่า 10^{-12} วินาที ไม่มีผลต่อเลขมวลและเลขอะตอมของไอโซโทปนั้น การปลดปล่อยรังสีแกมมาอาจมีหลายขั้นตอนขึ้นอยู่กับชนิดไอโซโทปจึงทำให้ได้รังสีแกมมาหลายพลังงาน

โคบอลต์-60 (Co-60) และซีเซียม-137 (Cs-137) เป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เป็นต้นกำเนิดของรังสีแกมมา ซึ่งมีการนำมาใช้ประโยชน์ทางเทคนิคด้านนิวเคลียร์ทั้งในด้านการแพทย์ การเกษตร และอุตสาหกรรม จนเป็นที่คุ้นเคย โดย Co-60 สลายตัวให้รังสีบีตาพลังงาน 0.318 MeV เป็นส่วนใหญ่เปลี่ยนเป็นนิเกิล-60* (Ni-60*) ที่นิวเคลียสยังมีระดับพลังงานสูง จากนั้นลงสู่สถานะพื้นโดยการปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 1.173 และ 1.332 MeV เปลี่ยนเป็นนิเกิล-60 (Ni-60) ซึ่งเป็นไอโซโทปเสถียร โดย Co-60 มีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 5.3 ปี ในขณะที่ Cs-137 มีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 30.17 ปี ประมาณ 95% สลายตัวโดยการปลดปล่อยรังสีบีตาพลังงาน 0.512 MeV เปลี่ยนเป็นแบเรียม-137m (Ba-137m) ซึ่งเป็นไอโซโทปกึ่งเสถียร (Meta-stable) แล้วจึงสลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 0.662 MeV ลงสู่ภาวะเสถียร ส่วนอีก 5% สลายตัวโดยตรงไปเป็น Ba-137 ซึ่งเป็นไอโซโทปเสถียร สำหรับการสลายตัวของ Co-60 และ Cs-137 สามารถเขียนในรูปของผังการสลายตัว (Decay scheme) ได้ในรูปที่ 2.1

เนื่องจากการปลดปล่อยรังสีแกมมาจากการสลายตัวของไอโซโทปรังสีมีรูปแบบและระดับพลังงานเฉพาะธาตุใด ๆ ดังนั้นจากคุณลักษณะดังกล่าวเครื่องมือตรวจวัดพลังงานของรังสีแกมมาจึงมีลักษณะเป็นเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีแกมมา (Gamma Spectrometer) สามารถใช้ในการวิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) เพื่อระบุชนิดของไอโซโทปได้ ปัจจุบันมีการพัฒนาอุปกรณ์วัดสเปกตรัมรังสีแกมมาชนิดพกพาที่ระบุชนิดของไอโซโทป สำหรับใช้ตรวจระบุชนิดไอโซโทปในงานภาคสนาม เช่น งานด้านสิ่งแวดล้อมและด้านความมั่นคงปลอดภัย เป็นต้น



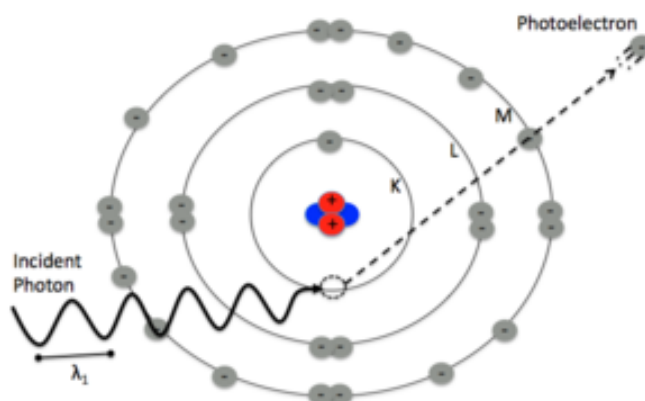
รูปที่ 2.1 แผนผังการสลายตัวของ Co-60 และ Cs-137

ที่มา www.wanda.fiu.edu

2.3 อันตรกิริยาของรังสีแกมมา

รังสีแกมมาเมื่อเคลื่อนผ่านตัวกลางใด ๆ จะก่ออันตรกิริยา (Interaction) กับตัวกลาง และสูญเสียพลังงานกับอะตอมตัวกลางได้ 3 แบบ [2] คือ

1.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) รังสีแกมมาที่มีพลังงานต่ำกว่า 200 keV เมื่อผ่านเข้าไปในตัวกลางมีโอกาสสูงที่จะเกิดการถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอะตอมตัวกลาง หากพลังงานที่ถ่ายเทให้สูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้น จะทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมตัวกลางหลุดออกจากอะตอม ดังรูปที่ 2.2 เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาว่าโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) โดยมีพลังงานจลน์เท่ากับผลต่างของพลังงานโฟตอนกับพลังงานยึดเหนี่ยว ซึ่งพลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ของโฟตอนเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกนี้ มีโอกาสเกิดขึ้นได้มากถ้าโฟตอนพลังงานต่ำทำอันตรกิริยากับสสารที่มีเลขอะตอมสูง เมื่อโฟโตอิเล็กตรอนซึ่งมีคุณสมบัติเดียวกับอนุภาคบีตาหลุดออกจากอะตอมก็จะก่อการไอออไนซ์ในตัวกลางเกิดคู่อิออน สำหรับรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูง โฟโตอิเล็กตรอนจะมีทิศทางเคลื่อนที่ในทางเดียวกันกับรังสี และจะทำมุมกับแนวการเคลื่อนที่ของรังสีแกมมาเมื่อมีพลังงานต่ำ



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก

ที่มา : Bushberg JT. The Essential Physics of Medical Imaging: Lippincott Williams & Wilkins; 2002

1.2 ปฏิกิริยาการกระเจิงคอมป์ตัน (Compton scattering) เมื่อรังสีแกมมาชนกับอะตอมตัวกลางแบบยืดหยุ่น จะถ่ายเทพลังงานเพียงบางส่วนให้กับอะตอมของตัวกลาง ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมไปในทิศทางทำมุมกับการเคลื่อนที่เดิมของรังสีแกมมา ดังรูปที่ 2.3 เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปว่า คอมป์ตันอิเล็กตรอน (Compton electron) ความยาวคลื่นของรังสีแกมมาที่กระเจิงออกไปจะเพิ่มขึ้นตามค่ามุมกระเจิง ดังสมการ

$$\Delta \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \phi) \dots \dots \dots (1)$$

เมื่อ $\Delta \lambda$ คือ ความยาวคลื่นของรังสีแกมมาที่เพิ่มขึ้น (Compton wavelength)

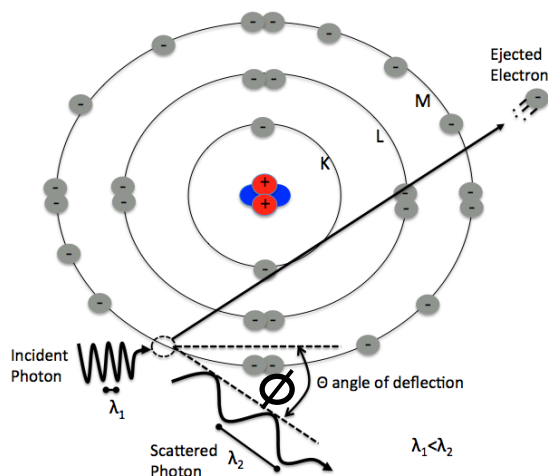
h คือ ค่าคงตัวของพลังค์

m คือ มวลของอิเล็กตรอน

c คือ ความเร็วของแสง

ϕ คือ ค่ามุมกระเจิงของรังสีแกมมา

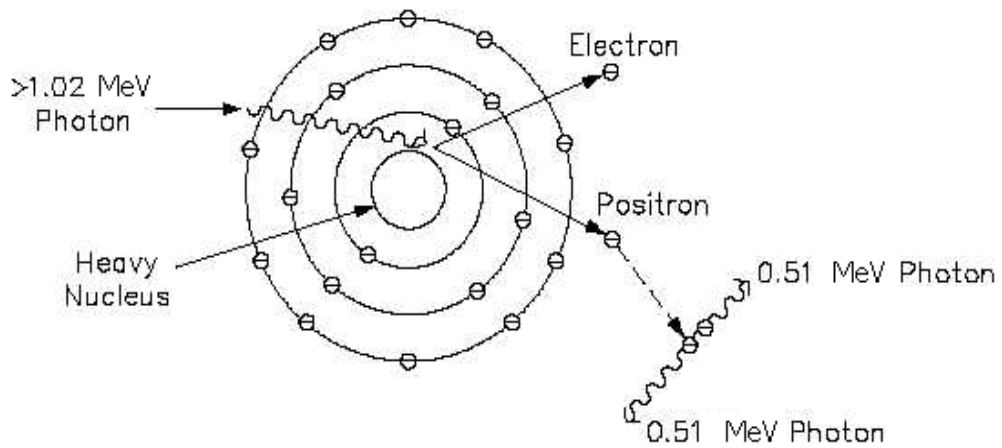
โดยพลังงานที่ถ่ายเทให้ตัวกลางจะมีค่า ตั้งแต่ 0 ถึงพลังงานของรังสีแกมมาที่เข้าชน โดยมากจะเกิดกับรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 0.1-10 MeV และจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานในช่วง 0.5-3.5 MeV ถ้ารังสีแกมมาที่กระเจิงออกไปมีพลังงานมากพอก็อาจเกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริกได้ต่อไปอีก



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการกระเจิงคอมป์ตัน

ที่มา : Bushberg JT. The Essential Physics of Medical Imaging: Lippincott Williams & Wilkins; 2002

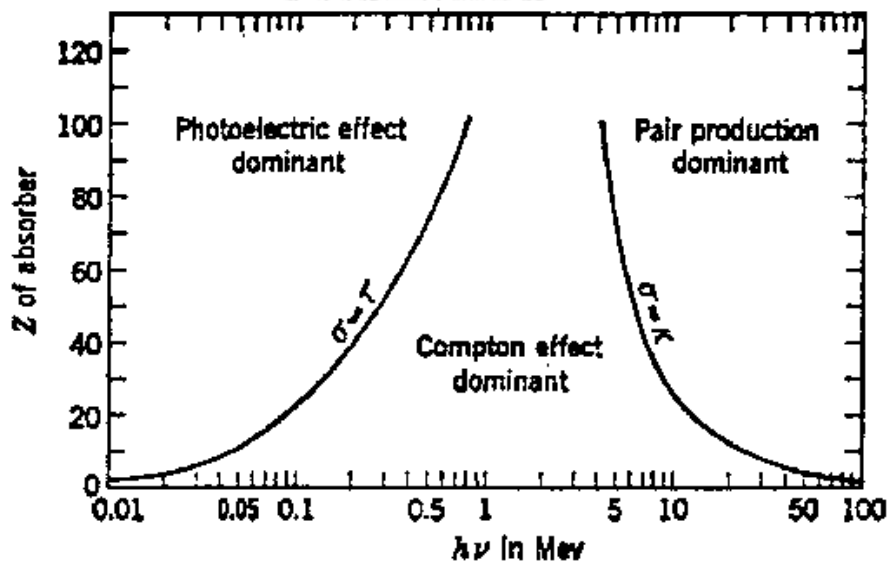
1.3 ปฏิกิริยาการแปรโปรดักชัน (Pair production) เป็นอันตรกิริยาที่มีการเปลี่ยนพลังงานของรังสีแกมมาเป็นมวล รังสีแกมมาที่จะเกิดอันตรกิริยานี้ต้องมีพลังงานสูงกว่า 1.02 MeV (พลังงานเทียบเท่าการสลายมวลนิ่ง (rest mass) ของอิเล็กตรอน-โพสิตรอน = 1.02 MeV) เนื่องจากอันตรกิริยาของรังสีแกมมาพลังงานสูงบริเวณใกล้นิวเคลียสนั้นพลังงานจะเปลี่ยนไปเป็นมวลของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน ส่วนพลังงานของรังสีแกมมาที่เหลือจะเป็นพลังงานของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน โพสิตรอนที่เกิดขึ้นนั้นหลังการถ่ายพลังงานให้ตัวกลางแล้วจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนอิสระกลายเป็นรังสีแกมมา 2 ตัว แต่ละตัวมีพลังงานเท่ากับ 0.511 MeV เรียกว่า Annihilation radiation ดังรูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการแปรโปรดักชันมีโอกาสเกิดได้มากขึ้น เมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงขึ้นกว่า 1.02 MeV และทำอันตรกิริยากับสสารที่มีเลขอะตอมสูง



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการแปรโปรตักชัน

ที่มา : Radiation type, Instrumentation and Control

พลังงานของรังสีแกมมาและเลขอะตอมของสสาร เป็นปัจจัยสำคัญของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก ปฏิกิริยาการกระเจิงคอมป์ตัน และปฏิกิริยาการแปรโปรตักชัน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขอะตอม พลังงานของรังสีแกมมา และอันตรกิริยาทั้งสาม

ที่มา : Advanced Laboratory, Physics 407 University of Wisconsin, 1999

2.4 การป้องกันอันตรายจากรังสี

คำว่ารังสีหรือนิวเคลียร์ อาจเป็นคำที่หลายคนหวาดกลัว อันเนื่องมาจากผลกระทบในทางลบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ทั้งจากการทิ้งระเบิดที่เมืองฮิโรชิมา และนางาซากิ ในสงครามโลกครั้งที่ 2 การระเบิดของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์เชอร์โนบิล และล่าสุดจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ฟูกูชิมะไดอิจิ ที่ทำให้เกิดความเสียหายอย่างมหัศจรรย์ ต่อเนื่องและยาวนาน ถึงแม้มนุษย์จะใช้ประโยชน์จากรังสีอย่างมากมา ก็ตาม เพื่อให้บุคคลทั่วไปและผู้ปฏิบัติงานทางรังสี มีความมั่นใจว่ามีความปลอดภัยจากรังสี จึงจำเป็นต้องมีเข้าใจหลักเกณฑ์ความปลอดภัยที่กำหนด พร้อมทั้งแนวปฏิบัติในการใช้และปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับรังสีเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด [1]

2.4.1 องค์การที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันอันตรายจากรังสี ได้แก่

1. คณะกรรมการระหว่างประเทศด้านการป้องกันรังสี The International Commission on Radiation Protection (ICRP) ICRP เป็นองค์กรทางวิทยาศาสตร์ที่เป็นอิสระ ไม่ขึ้นกับรัฐบาลของชาติใด ๆ ก่อตั้งขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1928 โดยสมาคมรังสีวิทยาระหว่างประเทศ (International Society of Radiology) ในตอนแรกมีชื่อว่า The International X-ray and Radium Protection committee ซึ่งในช่วงเวลานั้นประชาชนมีความเกี่ยวข้องและได้รับอันตรายจากรังสีเอกซ์และธาตุเรเดียม ICRP เป็นหน่วยงานเบื้องต้นที่รับผิดชอบในการป้องกันไม่ให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับอันตรายจากรังสีเหล่านั้น ในปี ค.ศ. 1950 หน้าที่ความรับผิดชอบของ ICRP ได้ขยายขอบเขตออกไป โดยเกี่ยวข้องกับปัญหาใหม่ ๆ ที่เกิดขึ้นจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์และจากองค์กรใหม่ ๆ ที่สร้างตามมา นับแต่นั้นมาขอบเขตการทำงานของ ICRP ได้รวมไปถึงความปลอดภัยในการนำรังสีและต้นกำเนิดรังสีไปใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ ด้วย ปัจจุบัน ICRP โดยการทำงานร่วมกันระหว่างนักวิทยาศาสตร์จากทั้งภายนอกและภายในองค์กรได้ตีพิมพ์หนังสือเกี่ยวกับการป้องกันอันตรายจากรังสีซึ่งเกี่ยวข้องกับประชาชน และผู้ปฏิบัติงานทางรังสีทั้งหมด 10 ภาษา นอกจากการตีพิมพ์คำแนะนำเกี่ยวกับการป้องกันอันตรายจากรังสีโดยทั่วไปแล้ว ICRP ยังได้จัดทำคำแนะนำเกี่ยวกับการป้องกันอันตรายจากรังสีในสาขาเฉพาะทางต่าง ๆ ด้วยเช่น การแพทย์ ทันตกรรม เหมืองแร่ เป็นต้น

2. คณะกรรมการระหว่างประเทศด้านความปลอดภัยทางรังสี The Inter-Agency Committee on Radiation Safety (IACRS) ได้ก่อตั้งขึ้นมาในปี ค.ศ. 1990 เพื่อสนับสนุนและมุ่งเน้นให้มีการนำเรื่องการป้องกันอันตรายจากรังสีไปประยุกต์ใช้ คณะกรรมการขององค์กรนี้มาจากนานาชาติที่ให้ความสำคัญเรื่องการป้องกันอันตรายจากรังสี และได้ร่วมกันจัดทำ The International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Source หรือรู้จักกันในนาม Basic Safety Standards (BSS) ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการ

จัดทำข้อกำหนดเพื่อเป็นการสนับสนุนในลักษณะของคำแนะนำหรือแนวปฏิบัติที่จะทำให้โครงการ การป้องกันอันตรายจากรังสีบรรลุดำเนินการได้ โดยข้อแนะนำของ BSS จะประกอบไปด้วยมาตรฐาน ต่าง ๆ หลักการเบื้องต้นในการป้องกันอันตรายจากรังสีซึ่งยึดตามหลักคำแนะนำของ ICRP และใช้ หลักความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ของ International Nuclear Safety Advisory Group (INSAG) ซึ่งเป็นกลุ่มที่จัดทำ Nuclear Safety Standards เพื่อใช้สำหรับการใช้ประโยชน์ทางนิวเคลียร์ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1985 หลักการที่จัดทำโดย INSAG จะมุ่งเน้นไปที่ต้นกำเนิดรังสีและเครื่องกำเนิดรังสีประเภทอื่น ๆ

3. คณะกรรมาธิการระหว่างประเทศด้านการวัดและหน่วยวัดรังสี The International Commission on Radiological Unit and Measurements (ICRU) ก่อตั้งขึ้นในปี ค.ศ.1925 จาก การประชุมรังสีวิทยาระหว่างประเทศ มีวัตถุประสงค์หลักในการให้คำแนะนำในด้าน ปริมาณและ หน่วยของรังสี และกัมมันตภาพรังสี วิธีการตรวจวัดรังสีที่เหมาะสมและการประยุกต์ใช้ปริมาณรังสีใน งานด้านต่าง ๆ

4. ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ The International Atomic Energy Agency (IAEA) เป็นองค์การหนึ่งของสหประชาชาติ (United Nation) ก่อตั้งขึ้นเมื่อปี ค.ศ.1957 เพื่อ ส่งเสริมการใช้พลังงานนิวเคลียร์ในทางสันติที่ออกข้อกำหนดและเสนอแนวปฏิบัติด้านความปลอดภัย ทางรังสีตามคำแนะนำของ ICRP เพื่อความปลอดภัยในการใช้พลังงานนิวเคลียร์ และเป็นศูนย์กลาง ความร่วมมือในด้านนิวเคลียร์ มีสำนักงานใหญ่อยู่ที่กรุงเวียนนา ประเทศออสเตรีย

2.4.2 หลักการป้องกันอันตรายจากรังสี

การได้รับรังสีเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ อย่างน้อยมนุษย์ทุกคนต้องได้รับรังสีจากธรรมชาติ ICRP ได้แบ่งประเภทของการได้รับรังสีไว้ 3 ประเภทคือ 1) การได้รับรังสีจากการปฏิบัติงาน (Occupational Exposure) ซึ่งจะมีโอกาสรับรังสีมากกว่าบุคคลทั่วไป 2) การได้รับรังสีทาง การแพทย์ (Medical Exposure) ทั้ง 3 สาขา คือ รังสีวินิจฉัย รังสีรักษา และเวชศาสตร์นิวเคลียร์ รวมถึงการใช้รังสีเอกซ์ 3) การได้รับรังสีของประชาชนทั่วไป (Public Exposure) จากวัสดุก่อสร้าง อาหาร และรังสีจากพื้นโลก เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้เกิดความปลอดภัยจากรังสี ICRP จึงเสนอเกณฑ์ จำกัดการรับปริมาณรังสีใน ICRP Publication ฉบับที่ 103 ซึ่งมีหลักสำคัญ 3 ประการคือ

1. การมีเหตุผลอันควร (Justification)

เมื่อจะต้องมีการตัดสินใจยอมรับหรือนำวิธีการใหม่ ๆ มาใช้ โดยที่วิธีการหรือการดำเนินการนั้น ๆ มีความเสี่ยงที่จะได้รับอันตรายจากรังสี จะต้องมีการเปรียบเทียบถึงประโยชน์ที่จะได้รับกับความเสี่ยงของอันตรายที่จะเกิดขึ้นเสียก่อนว่าให้ผลดีคุ้มค่า มากกว่าความเสี่ยงที่อาจเกิดความเสียหายต่อสุขภาพ เช่น การรับรังสีเพื่อตรวจวินิจฉัยการเป็นมะเร็ง ต้องพิจารณาให้เห็นว่าได้รับประโยชน์จากการตรวจวินิจฉัยมากกว่าความเสี่ยง เนื่องจากมีการรับรังสีเพิ่มขึ้นจากการตรวจวินิจฉัยนั้น

2. การป้องกันที่เหมาะสม (Optimization)

แม้จะพิจารณาแล้วว่าการได้รับรังสีครั้งนั้น ๆ มีผลดีมากกว่าผลเสียแล้ว ปริมาณรังสีที่บุคคลได้รับ จำนวนคนที่ได้รับรังสีรวมทั้งขนาดของปริมาณรังสีที่ได้รับจากการปฏิบัติงานทางรังสีจะต้องยึดหลักปฏิบัติว่าจะต้องได้รับรังสีน้อยที่สุด แต่ต้องคำนึงถึงปัจจัยทางเศรษฐกิจ สังคม การเมืองตลอดจนข้อกฎหมายต่าง ๆ ด้วย ซึ่งตามหลักการ ALARA (As Low As Reasonably Achievable) หมายความว่า การจะนำมาใช้ซึ่งประโยชน์ของรังสีและสารกัมมันตรังสีนั้นจะต้องดำเนินการด้วยวิธีการใด ๆ ก็ตามที่ทำให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับรังสีน้อยที่สุดและไม่ก่อให้เกิดอันตราย เช่น เจ้าหน้าที่ฉายรังสีให้กับคนไข้ จะต้องปฏิบัติเพื่อให้ผู้ฉายรังสีและผู้รับรังสีได้รับรังสีต่ำสุด แต่บรรลุวัตถุประสงค์ของการฉายรังสีในครั้งนั้น

3. การจำกัดปริมาณรังสีที่ได้รับ (Limitation)

แม้ว่ามนุษย์จะไม่สามารถหลีกเลี่ยงการได้รับรังสีได้ แต่ก็สามารถจำกัดปริมาณรังสีที่ได้รับได้เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ ICRP ได้แนะนำว่าปริมาณรังสีที่บุคคลได้รับจะต้องไม่เกินขีดจำกัดปริมาณการได้รับรังสี (Dose Limit) ซึ่งเป็นค่ากำหนดสูงสุดของปริมาณรังสียังผลหรือปริมาณรังสีสมมูล ที่ยอมให้บุคคลรับได้จากการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ทางรังสี ขีดจำกัดปริมาณรังสีถูกกำหนดไว้สำหรับบุคคล 2 กลุ่มหลัก คือ ผู้ปฏิบัติงานทางรังสีและบุคคลทั่วไป ขีดจำกัดปริมาณรังสีที่ ICRP เสนอแนะไว้ใน Publication ฉบับที่ 103 กำหนดให้ผู้ปฏิบัติงานด้านรังสี ได้รับปริมาณรังสียังผล เฉลี่ยไม่เกิน 20 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี ในระยะเวลา 5 ปีติดต่อกัน โดยแต่ละปีต้องได้รับไม่เกิน 50 มิลลิซีเวิร์ต/ปี สำหรับบุคคลทั่วไป ให้รับปริมาณรังสียังผลไม่เกิน 1 มิลลิซีเวิร์ต/ปี หรือเฉลี่ยใน 5 ปี ต้องไม่เกิน 1 มิลลิซีเวิร์ต/ปี ขีดจำกัดปริมาณรังสีที่ ICRP เสนอแนะ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ขีดจำกัดปริมาณรังสีที่ ICRP เสนอแนะใน Publication ฉบับที่ 103

	ผู้ปฏิบัติงานทางรังสี	บุคคลทั่วไป
ปริมาณรังสียังผล	เฉลี่ยไม่เกิน 20 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี ในระยะเวลา 5 ปีติดต่อกัน โดยแต่ละปีต้องได้รับไม่เกิน 50 มิลลิซีเวิร์ต/ปี	1 มิลลิซีเวิร์ต/ปี
ปริมาณรังสีสมมูลที่เลนส์ตา	เฉลี่ยไม่เกิน 20 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี ในระยะเวลา 5 ปีติดต่อกัน โดยแต่ละปีต้องได้รับไม่เกิน 50 มิลลิซีเวิร์ต/ปี	15 มิลลิซีเวิร์ต/ปี
ปริมาณรังสีสมมูลที่ผิวหนัง	500 มิลลิซีเวิร์ต/ปี	50 มิลลิซีเวิร์ต/ปี
ปริมาณรังสีสมมูลที่มือและเท้า	500 มิลลิซีเวิร์ต/ปี	-

2.4.3 การป้องกันอันตรายทางรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสี

การได้รับรังสีของผู้ปฏิบัติงานทางรังสีสามารถได้รับรังสี 2 ทาง ได้แก่ การได้รับรังสีแบบภายนอกร่างกาย (External Exposure) และการได้รับรังสีแบบเข้าสู่ร่างกาย (Internal Exposure)

การใช้หรือปฏิบัติงานกับแหล่งกำเนิดรังสีภายนอกร่างกายมักเป็นแหล่งกำเนิดรังสีชนิดปิดผนึก (Sealed source) กล่าวคือวัสดุกัมมันตรังสีจำนวนหนึ่ง ถูกห่อหุ้มอย่างมิดชิด แล้วปิดผนึกถาวรด้วยวัสดุที่แข็งแรง เพื่อการป้องกันการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสี โดยทั่วไปจะเน้นการป้องกันรังสีแกมมา รังสีเอกซ์ และนิวตรอน เนื่องจากมีความสามารถทะลุทะลวงสูงในการควบคุมความปลอดภัยจากการได้รับรังสีภายนอกร่างกาย ผู้ปฏิบัติงานควรยึดหลัก ALARA (As Low As Reasonably Achievable) ถือเป็นกฎพื้นฐานการดำเนินการใด ๆ ที่ทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่มีระดับรังสีน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ พิจารณาประกอบในการปฏิบัติงานเทคนิคพื้นฐานการควบคุมอันตรายจากต้นกำเนิดรังสีที่อยู่ภายนอกร่างกาย (Controlling the external radiation hazard) มีด้วยกัน 3 วิธีคือการพิจารณาในเรื่องของ เวลา (Time), ระยะทาง (Distance) และเครื่องกำบัง (Shielding)

เวลา (Time)

การควบคุมเวลาในการปฏิบัติงานกับสารรังสีเป็นวิธีการสำคัญในการลดปริมาณรังสีที่จะได้รับ การลดเวลาในการทำงานกับสารรังสีหรือสัมผัสกับสารรังสี ก็จะช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับรังสีน้อยลง การคำนวณเวลาที่เหมาะสมสำหรับการปฏิบัติงานกับสารรังสี สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$D = R \times T \quad \dots\dots\dots (2)$$

โดยที่ D หมายถึง อัตราปริมาณรังสีสูงสุดที่ทำงานได้

R หมายถึง อัตราปริมาณรังสี

T หมายถึง เวลาที่อนุญาตให้ทำงานได้

กำหนดการได้รับรังสียังผลเท่ากับ 20 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี ดังนั้นอัตราการได้รับรังสีสูงสุดที่ทำงานได้ใน 1 วันเมื่ออัตราปริมาณรังสีสูงสุดที่ยอมให้รับได้ต่อชั่วโมงเท่ากับ เท่ากับ 10 ไมโครซีเวิร์ตต่อชั่วโมง เมื่อคิดเวลาทำงานต่อวันคือ 8 ชั่วโมง ดังนั้นอัตราปริมาณรังสีสูงสุด (Dose limit) ที่รับได้ใน 1 วันจึงหาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าสูตร เท่ากับ } D &= 10 \text{ ไมโครซีเวิร์ตต่อชั่วโมง} \times 8 \text{ ชั่วโมง} \\ &= 80 \text{ ไมโครซีเวิร์ต} \end{aligned}$$

เมื่อทราบค่า $D_{R \times T}$ แล้วสามารถคำนวณเวลาที่เหมาะสมสำหรับปฏิบัติงานกับรังสีได้จากสูตร

$$\text{เวลาที่สามารถทำงานได้} = \frac{\text{อัตราปริมาณรังสีสูงสุด}}{\text{อัตราปริมาณรังสี ณ บริเวณนั้น}} \dots\dots\dots (3)$$

ดังนั้น ข้อควรปฏิบัติคือ

- วางแผน เตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือต่าง ๆ และปรึกษางานล่วงหน้าก่อนเข้าไปบริเวณรังสี
- ทำงานอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

ระยะทาง (Distance)

การควบคุมระยะห่างระหว่างผู้ปฏิบัติงานกับสารรังสี เป็นอีกวิธีหนึ่งในการลดอันตรายจากรังสีที่อยู่ภายนอกร่างกาย หากผู้ปฏิบัติงานสามารถทำงานได้ห่างจากต้นกำเนิดรังสีให้มากที่สุด ผู้ปฏิบัติงานก็จะได้รับรังสีน้อยที่สุด

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการได้รับรังสีกับระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีสามารถคำนวณได้จากกฎกำลังสองผกผัน (Inverse square law's) เมื่ออยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีไปเท่าตัว ปริมาณรังสีที่ได้รับจะลดลงเหลือ 1 ใน 4 ดังนี้

$$I = \frac{k}{d^2} \dots\dots\dots (4)$$

โดยที่ I หมายถึง อัตราปริมาณรังสี

d หมายถึง ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสี

k หมายถึง ค่าคงที่ซึ่งจะเปลี่ยนไปตามชนิดของต้นกำเนิดรังสี

ในกรณีที่เป็ต้นกำเนิดรังสีชนิดเดียวกัน ค่า k จะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นสูตร Inverse square law's สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$I_1 d_1^2 = I_2 d_2^2 \dots\dots\dots (5)$$

โดยที่ I_1 หมายถึง อัตราปริมาณรังสีเมื่อห่างจากต้นกำเนิดรังสีเป็นระยะทาง d_1^2
 I_2 หมายถึง อัตราปริมาณรังสีเมื่อห่างจากต้นกำเนิดรังสีเป็นระยะทาง d_2^2
 d_1 หมายถึง ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสี ณ จุดที่ 1
 d_2 หมายถึง ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสี ณ จุดที่ 2

สมการดังกล่าวใช้ได้ถูกต้องกับต้นกำเนิดรังสีแบบจุด (Point source) เท่านั้น หากเป็นต้นกำเนิดมีรูปร่างแบบอื่น ๆ เช่น เส้น (line) ทรงกระบอก (cylinder) หรือแบบดิสก์ (disc) จะต้องมีระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีมากกว่า 10 เท่าของความกว้างสูงสุดของต้นกำเนิดรังสีนั้น โดยอัตราปริมาณรังสีที่ได้รับขึ้นอยู่กับ ชนิดของรังสี กัมมันตภาพรังสี ระยะทาง และพลังงาน ดังตัวอย่างอัตราปริมาณรังสีแกมมาของไอโซโทปรังสีบางชนิดที่ ICRP ได้แนะนำใน Publication ฉบับที่ 38 ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 อัตราปริมาณรังสีแกมมาของไอโซโทปที่มีกัมมันตภาพ 10 MBq ที่ระยะ 1 เมตร

ไอโซโทป	อัตราปริมาณรังสี ($\mu\text{Sv/h}$)
Na-22	3.65
Cr-51	0.05
Fe-59	1.98
Co-57	0.21
Co-60	4.17
I-125	0.07
I-131	0.63

ดังนั้น ข้อควรปฏิบัติ คือ

- ควรปฏิบัติงานโดยอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีมากที่สุด
- ใช้อุปกรณ์ควบคุมระยะไกลช่วยทำงาน
- ระหว่างรอปฏิบัติงาน ให้อยู่ในบริเวณที่มีอัตราปริมาณรังสีต่ำ

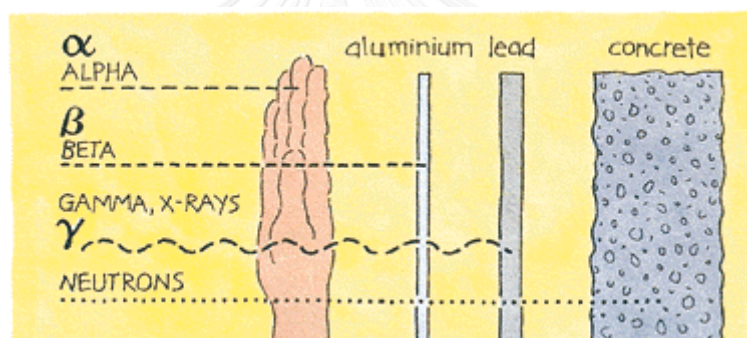
เครื่องกำบังรังสี (Shielding)

การเลือกใช้ชนิดเครื่องกำบังรังสี ต้องคำนึงถึง

1. ความแรงรังสีของต้นกำเนิดรังสี

2. ชนิดของรังสี/พลังงานรังสี เช่น รังสีแกมมา รังสีบีตาพลังงานสูง รังสีบีตาพลังงานต่ำ รังสีแอลฟา
3. ค่าที่ยอมรับได้หลังจากผ่านเครื่องกำบังรังสี เช่น ค่าที่ยอมให้ผู้ปฏิบัติงานรับได้ในระหว่างปฏิบัติงาน

การวางวัสดุใด ๆ ระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีกับผู้ปฏิบัติงานจะทำหน้าที่เป็นตัวกำบัง ทำให้ลดปริมาณรังสีลง โดยรังสีแอลฟาถูกดูดกลืนได้ง่ายจึงไม่มีปัญหาในการกำบัง รังสีบีตาซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่าแอลฟา และเมื่อรังสีบีตาเคลื่อนที่เข้าไปในสสารที่มีเลขอะตอมสูง ผ่านบริเวณสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสูงของนิวเคลียสที่มีประจุบวก จะถูกหน่วงความเร็วลง และเบี่ยงเบนทิศทาง พร้อมกับปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา เรียกว่า รังสีเบรมส์ชตราลุง (Bremsstrahlung radiation) จึงจำเป็นต้องใช้ตัวกำบังรังสีที่สามารถป้องกันรังสีบีตาและเบรมส์ชตราลุง ในรูปที่ 2.6 แสดงความสามารถในการทะลุทะลวงผ่านวัสดุของรังสีที่ต่างชนิดกัน



รูปที่ 2.6 ชนิดของรังสีซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงต่างกัน

ที่มา : <http://galileo.phys.virginia.edu>

สำหรับการควบคุมความปลอดภัยทางรังสีของการได้รับรังสีภายในร่างกาย จากการเข้าสู่ร่างกายของการใช้สารกัมมันตรังสีที่ไม่ได้ปิดผนึก มีลักษณะเป็นของเหลว สารระเหย ฝุ่น ก๊าซ เป็นต้น ผู้ปฏิบัติงานต้องระมัดระวังไม่ให้สารรังสีเข้าสู่ร่างกาย ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ทางด้วยกัน ได้แก่ การกิน การหายใจ การซึมที่ผิวหนัง การเข้าทางบาดแผล การตรวจวัดการเปื้อนทางรังสีจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะลดโอกาสการได้รับรังสีเข้าสู่ภายในร่างกายได้

2.5 เครื่องมือวัดรังสี

การป้องกันอันตรายจากรังสี จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือวัดรังสีที่เหมาะสม เครื่องมือสำหรับตรวจวัดรังสีแบ่งเป็น 2 กลุ่มประกอบด้วย

1. เครื่องมือวัดสำหรับการป้องกันรังสีภายนอกร่างกาย (External exposure) ได้แก่ เครื่องวัดอัตราปริมาณรังสี (Dose rate meters, หน่วย mR/hr, $\mu\text{Sv/hr}$) เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้วัดรังสีที่มีความสามารถทะลุทะลวงสูง ได้แก่ แกมมาและบีตา สำหรับนิวตรอนจะเป็นเครื่องวัดเฉพาะ และเครื่องวัดปริมาณรังสีประจำตัวบุคคล (Personal monitoring, หน่วย μSv) เพื่อวัดปริมาณรังสีสะสมที่ร่างกายได้รับ ถูกออกแบบให้ใช้งานด้วยการนำไปติดประจำตัวบุคคลขณะทำงาน

2. เครื่องมือวัดสำหรับการป้องกันรังสีเข้าสู่ร่างกาย (Internal exposure) ได้แก่ เครื่องตรวจสอบการเปื้อนทางรังสี เช่น เครื่องวัดความเปื้อนทางรังสี (Portable Contamination monitors) สำหรับวัดการเปื้อนทางรังสีบนพื้นผิวใด ๆ ส่วนใหญ่ออกแบบให้วัดรังสีแอลฟา บางชนิดวัดรังสีบีตาได้ มีหน่วยเป็น Bq/m^2 ตัวอย่างเครื่องสำรวจการเปื้อนทางรังสีแสดงในรูป 2.7 ก. และเครื่องตรวจวัดการเปื้อนทางรังสีในอากาศ (Airborne Contamination monitors) สำหรับวัดปริมาณการปนเปื้อนทางรังสีในอากาศ ได้แก่ ฝุ่นละออง ฝุ่นกัมมันตรังสี แก๊ส ไอระเหย การวัดรังสีทำได้โดยการเก็บอากาศและดักจับที่เหมาะสม มีหน่วยเป็น Bq/cm^3 รูปตัวอย่างเครื่องตรวจวัดการเปื้อนทางรังสีในอากาศแบบติดตั้งกับที่ เพื่อวัดฝุ่นละอองรังสีที่ฟุ้งกระจายในอากาศของบริษัท Canberra รุ่น CAM100G แสดงในรูป 2.7 ข.



ก)



ข)

รูปที่ 2.7 ก. เครื่องสำรวจความเปื้อนทางรังสีแบบพกพา

ข. เครื่องตรวจวัดการเปื้อนทางรังสีในอากาศแบบติดตั้งกับที่

ที่มา http://www.hko.gov.hk/m/article_e.htm?title=ele_00339

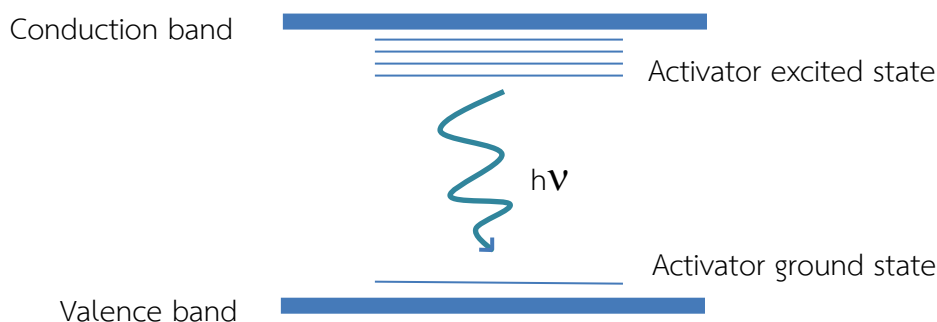
เครื่องมือวัดรังสีดังกล่าวจะใช้หัววัดรังสีที่แตกต่างกัน สามารถแบ่งหัววัดรังสีออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ 1. หัววัดรังสีแบบบรรจุก๊าซ 2. หัววัดรังสีแบบซินทิลเลเตอร์ 3. หัววัดรังสีแบบกึ่ง

ตัวนำ 4. หัววัดรังสีนิวตรอน โดยเครื่องวัดรังสีแต่ละเครื่องจะใช้หัววัดรังสีประเภทใด ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการใช้งานเครื่องวัดรังสีชนิดนั้น ๆ เครื่องวัดเหล่านี้ไม่สามารถระบุชนิดของไอโซโทปรังสีได้

2.5.1 การตรวจวัดรังสี

2.5.1.1 หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน

การทำงานของหัววัดรังสีชนิดนี้อาศัยคุณสมบัติดั้งเดิมที่นักวิทยาศาสตร์ค้นพบกัมมันตภาพรังสี กล่าวคือเมื่อกัมมันตภาพรังสีตกกระทบผลึกหรือสารบางชนิดที่ฉาบไว้บนฉากรวมที่มีดี จะเห็นการเปล่งแสงเกิดขึ้น ณ บริเวณที่รังสีกระทบ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเรืองรังสี (Scintillation) โดยกระบวนการเรืองรังสีจะเกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างผลึกได้รับรังสี กลุ่มอิเล็กตรอนในพันธะโครงสร้างที่มีพลังงานในช่วง valence band จะได้รับการดูดกลืนพลังงานและยกระดับผ่าน forbidden gap ขึ้นไปที่ระดับพลังงาน conduction band และกลับลงมาอยู่ในบริเวณกับดักอิเล็กตรอนบริเวณ forbidden gap (ซึ่งบริเวณ Trapping state นี้จะมีเฉพาะสารที่เปล่งแสงได้เท่านั้น) ทำให้อิเล็กตรอนเกิดสถานะ excitation กลุ่มอิเล็กตรอนจะยกระดับขึ้นไปมากน้อยเพียงใด ขึ้นกับพลังงานของรังสี จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะลดระดับพลังงานสู่ระดับพื้นพร้อมปลดปล่อยโฟตอนแสง (light photon) ที่มีความเข้มแสงเป็นสัดส่วนกับพลังงาน ในสารบริสุทธิ์อิเล็กตรอนจะกลับสู่สถานะปกติที่ระดับพื้นบริเวณ valence band โฟตอนแสงที่เปล่งออกมาอาจมีความยาวคลื่นไม่ตรงกับการตอบสนองของอุปกรณ์เปลี่ยนแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อให้ได้โฟตอนแสงที่มีความยาวคลื่นตามที่ต้องการจึงต้องเจือสารก่อกมลทินเข้าไปซึ่ง เรียกว่า activators ส่วนมากจะเป็นสารอนินทรีย์ ก่อให้เกิดบริเวณกับดักของสารเจือบริเวณ forbidden gap ที่ระดับพลังงานต่ำกว่า ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนลดระดับพลังงานจะมาพักที่บริเวณกับดักสารเจือก่อนสู่ระดับพื้น (activator ground state) ทำให้โฟตอนแสงมีความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.8 หลักการนี้เป็นพื้นฐานของกระบวนการเรืองรังสี [4]



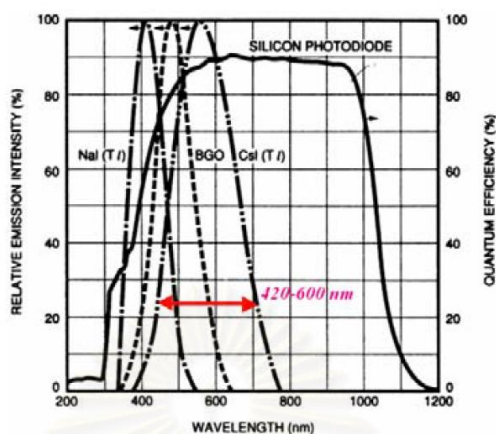
รูปที่ 2.8 การเปล่งแสงของผลึกสารอนินทรีย์

สารอนินทรีย์ที่นิยมใช้ในหัววัดเรืองรังสีมักเป็นสารกลุ่มแอลคาไลแฮไลด์ (Alkali halide) เช่น NaI, CsI เพราะมีประสิทธิภาพที่ดีในการเปล่งแสง ผลึกบริสุทธิ์ของ NaI จะให้แสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 200 nm และเมื่อเติมสารเจือ TL เป็น activator จะให้แสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 400 nm แต่ NaI (TL) มีข้อเสียคือเป็นผลึกไวต่อความชื้น แดกหักง่าย ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความร้อน

ขนาดความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกและความสว่างแสงที่เปล่งนั้นเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของผลึกซินทิลเลเตอร์ ความเข้มแสงจะส่งผลกระทบต่อจำนวนของโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของโฟโตไดโอดชนิดพิน ซึ่งจะถูกแปลงเป็นความสูงของสัญญาณพัลส์ ดังนั้นข้อมูลการตอบสนองความยาวคลื่นแสงจึงมีความจำเป็นเพื่อที่จะจับคู่กันระหว่างตัวผลึกซินทิลเลเตอร์ (ผลึกเรืองรังสี) และตัวโฟโตไดโอดชนิดพินที่เหมาะสม สเปกตรัมแสงที่เปล่งออกมาจาก NaI (TL), CsI (TL), BGO และการตอบสนองของซิลิกอนพินโฟโตไดโอด แสดงในรูปที่ 2.9

CsI (TL) เป็นผลึกที่มีความหนาแน่น $4.51 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ และมีเลขอะตอมสูงกว่า NaI ทำให้มีประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมาได้ดีกว่า ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแสงของ CsI (TL) มีค่าประมาณ 45% ของ NaI (TL) ณ อุณหภูมิห้อง ที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว (77K) CsI จะให้ความเข้มแสงออกมาเท่ากับของ NaI (TL) ที่อุณหภูมิห้อง และค่าคงที่การสลายตัวเท่ากับ 10^{-6} วินาที แสงที่ปล่อยจาก CsI (TL) มีความยาวคลื่นครอบคลุมช่วง 420 ถึง 600 นาโนเมตร ซึ่งเหมาะแก่การต่อเชื่อม (Coupling) กับซิลิกอนพินโฟโตไดโอด

CsI (TL) ไม่ค่อยดูดความชื้น เหนือมี มีความคล้ายพลาสติกมากกว่า NaI (TL) ไม่มีโพแทสเซียมปนอยู่ สามารถทนต่อการกระแทก การสั่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี [5]

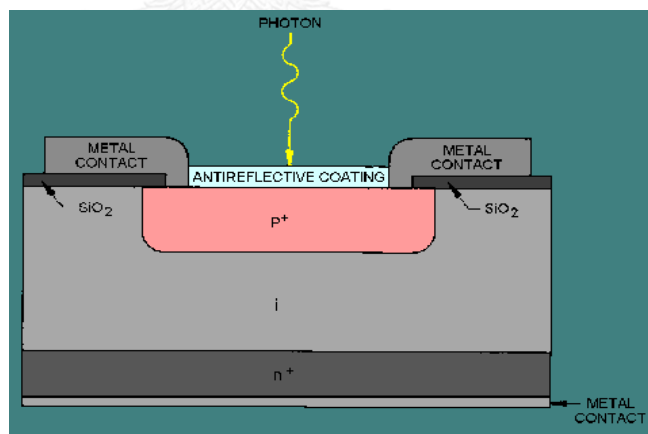


รูปที่ 2.9 สเปกตรัมของ NaI (TL), CsI (TL), BGO กับการตอบสนองความยาวคลื่นแสงของซิลิกอนพินโฟโตไดโอด

ที่มา : Hamamatsu Si Photodiode selection guide, 2017

2.5.1.2 โฟโตไดโอดชนิดพิน

โฟโตไดโอดชนิดพิน หรือ พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) คือ ไดโอดไวแสงที่มีรอยต่อชนิด p-i-n ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากโฟโตไดโอดธรรมดาตรงที่ระหว่างชั้น p และชั้น n จะมีชั้น i คั่นอยู่ ชั้น i นี้หมายถึงชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีการโด๊ปด้วยสารเจือปนด้วยปริมาณน้อยมากจนเกือบบริสุทธิ์ (intrinsic) ลักษณะเด่นของพินโฟโตไดโอด คือ จากการที่มีชั้น i จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อ (junction capacitance) มีค่าน้อย [6] ทำให้ใช้ความเข้มแสงต่ำในการเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าจึงมีความไวแสงสูง และมีความเร็วของการเปลี่ยนแปลงแสงสูงมากถึงระดับพิโกวินาที (ps) นิยมใช้ในการรับสัญญาณแสงสำหรับการสื่อสารที่ส่งมาทางเส้นใยนำแสง มีหลักการทำงาน คือ เมื่อแสงที่ตกกระทบมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานระยะห่างแถบ (band-gap energy) ของสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อ โฟตอนแสงจะทำอันตรกิริยากับอะตอมเกิด Secondary electron ซึ่งจะรับพลังงานจากโฟตอนและก่อการไอออไนซ์ทำให้เกิดปริมาณคู่อิเล็กตรอนและโฮลหรือพาหะประจุที่อิสระ จากนั้นสนามไฟฟ้าความเข้มสูงของไบแอสย้อนกลับ (Reverse bias) ที่ในบริเวณปลอดพาหะจะทำให้ประจุแยกออกจากกัน เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรไบแอสด้านนอกและเปลี่ยนเป็นสัญญาณพัลส์แรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดความสูงพัลส์เป็นสัดส่วนกับความเข้มแสง ภาคตัดขวางโครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดพินแสดงในรูป 2.10



รูปที่ 2.10 ภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิดพิน

ที่มา : SEMICONDUCTOR MATERIAL AND DEVICE PROPERTIES, Integrated Publishing, Inc.

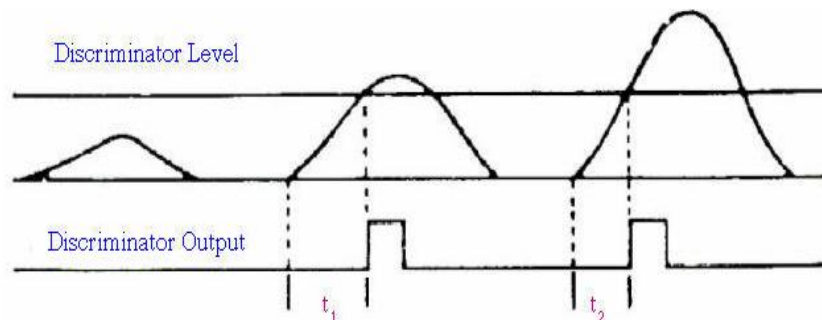
2.5.2 การวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีแกมมา

การวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมา เป็นการคัดเลือกความสูงของสัญญาณพัลส์ที่มีขนาดเป็นสัดส่วนกับพลังงาน เพื่อแสดงค่าการกระจายขนาดความสูงเชิงสถิติในรูปของฮิสโตแกรม

(Pulse height histogram distribution) เทคนิคการวิเคราะห์แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ การวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยว (Single Channel Analyzer; SCA) และการวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer; MCA) ระบบวิเคราะห์ที่ออกแบบง่ายและมีราคาประหยัด คือ ระบบวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยว

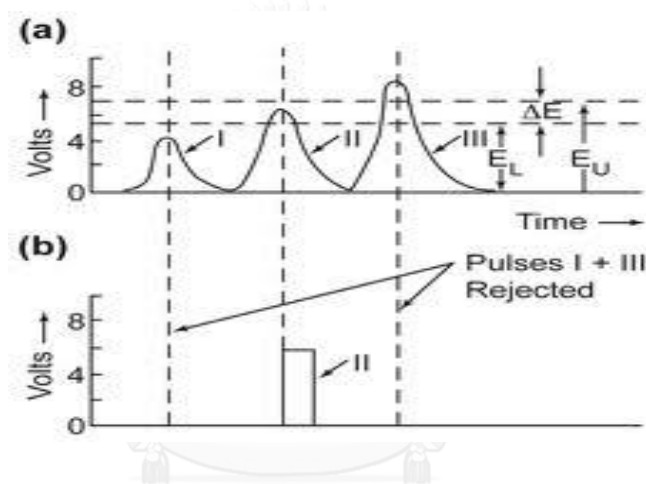
2.5.2.1 ระบบวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยว (Single Channel Analyzer)

การวิเคราะห์ความสูงของพัลส์โดยใช้อุปกรณ์วิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยวเป็นการเลือกวัดความแรงรังสีเฉพาะระดับความสูงของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ ซึ่งความสูงของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์จะเป็นค่าที่แสดงถึงพลังงานของรังสีที่ตกกระทบหัววัดรังสีและอยู่ในช่วงพลังงานที่เลือก โดยหลักการในการเลือกวัดขนาดพัลส์นิวเคลียร์ที่ได้มาจากเอาท์พุทของอุปกรณ์ขยายสัญญาณในเบื้องต้น สามารถทำได้โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ดิสคริมิเนเตอร์ (Discriminator) ซึ่งการทำงานของอุปกรณ์ดิสคริมิเนเตอร์ เริ่มจากเมื่อสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่ได้รับเข้ามามีระดับความสูงของสัญญาณมากกว่าระดับเทรชโฮลด์ (Threshold level) ที่ถูกตั้งค่าไว้ อุปกรณ์ดิสคริมิเนเตอร์จะให้สัญญาณพัลส์ลอจิก (Logic pulse) ที่เอาท์พุท ดังในรูปที่ 2.11 จะเห็นว่าสัญญาณพัลส์ที่มีระดับต่ำกว่าระดับเทรชโฮลด์จะไม่เกิดสัญญาณพัลส์ลอจิก ส่วนสัญญาณพัลส์ที่สูงกว่าระดับเทรชโฮลด์จะเกิดสัญญาณพัลส์ลอจิกที่เอาท์พุทของอุปกรณ์ดิสคริมิเนเตอร์ โดยมีลักษณะการเกิดสัญญาณลอจิกพัลส์เกิดขึ้นที่ขอบขาขึ้น (Leading edge) ของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ แต่เนื่องจากเวลาในการเกิดพัลส์ลอจิกจะเป็นฟังก์ชันของขนาดสัญญาณ (Amplitude) และไรส์ไทม์ (Rise time) ของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่มีรูปสัญญาณกึ่งเกาส์เซียน (Semi-Gaussian) ที่อินพุทของอุปกรณ์ดิสคริมิเนเตอร์ จึงเป็นผลให้เกิด (Time walk) ดังรูปที่ 2.13 การทำงานของอุปกรณ์ดิสคริมิเนเตอร์ที่เลือกนับรังสีที่มีขนาดสัญญาณพัลส์สูงเกินระดับดิสคริมิเนเตอร์ระดับเดี่ยวนี้นี้ เรียกว่า อินทิกรัลดิสคริมิเนเตอร์ (Integral discriminator) การคัดเลือกสัญญาณพัลส์เพื่อนำไปสร้างสเปกตรัมพลังงานแบบอินทิกรัลจะนำมาใช้วิเคราะห์ในทางปฏิบัติได้ลำบาก [7]



รูปที่ 2.11 การเกิดลอจิกพัลส์ของอินทิกรัลดิสคริเมเนเตอร์

ที่มา : Ortec. n.d. Modular Pulse-Processing Electronics Catalog



รูปที่ 2.12 การเกิดสัญญาณลอจิกพัลส์ของระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบช่องเดี่ยว

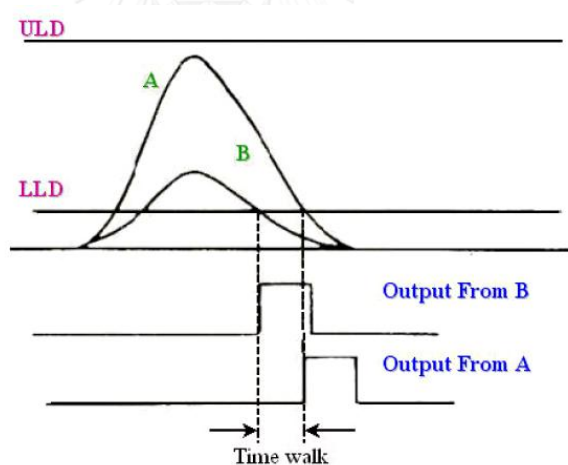
(a) สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณ

(b) สัญญาณเอาต์พุตจากระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบช่องเดี่ยว

จึงได้มีการสร้างกระบวนการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบคัดเลือกความต่างระดับของขนาดสัญญาณพัลส์ เรียกว่า ดิฟเฟอเรนเชียลดิสคริเมเนเตอร์ (Differential discriminator) ประกอบด้วยอุปกรณ์ ดิสคริเมเนเตอร์ 2 ระดับ คือ ดิสคริเมเนเตอร์ระดับต่ำ (Lower level discriminator : LLD) และดิสคริเมเนเตอร์ระดับสูง (Upper level discriminator : ULD) และตัดแยกเชิงลอจิกของสัญญาณ 2 ระดับที่อยู่ในช่วงหน้าต่างของพลังงาน ($\Delta E = ULD - LLD$) ที่ตั้งไว้ ซึ่งเรียกว่า “ช่องวิเคราะห์พลังงาน” การทำงานของระบบวิเคราะห์ความสูงพัลส์ชนิดนี้เป็นรูปแบบการทำงานจากระบบวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยว ระบบจะให้สัญญาณลอจิกพัลส์เมื่อสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่ได้รับมีระดับความสูงของสัญญาณอยู่ในช่วงระหว่างเทรสโฮลด์ทั้ง 2 ระดับ โดยการเกิด

สัญญาณลอจิกพัลส์จะเกิดบริเวณขอบขาลง (Falling edge) ของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่ตัดกับระดับดิสคริเมเนเตอร์ด้านต่ำดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งจากรูปจะแสดงให้เห็นว่ามีเพียงสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ II ที่ถูกสร้างเป็นสัญญาณลอจิกพัลส์ แต่ถ้าทำการปรับตั้งค่าช่องวิเคราะห์พลังงานของระดับดิสคริเมเนเตอร์มีระดับสูงคร่อมสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ III ระบบจะสร้างสัญญาณลอจิกพัลส์ของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ III ออกมา

ระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบช่องเดียวตามพื้นฐานลักษณะปล่อยสัญญาณลอจิกจำแนกได้ 2 ชนิด คือ นอนไทม์มิง SCA (Non timing SCA) และ ไทม์มิง SCA (Timing SCA) ในการทำงานแบบนอนไทม์มิง SCA นี้สัญญาณพัลส์นิวเคลียร์แบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) ที่ถูกคัดเลือกในช่องวิเคราะห์ จะปล่อยสัญญาณลอจิกพัลส์ที่บริเวณขอบขาลงของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่ตัดกับระดับดิสคริเมเนเตอร์ด้านต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งการทำงานแบบนี้จะส่งผลให้เกิดไทม์วอล์คสำหรับการทำงานแบบไทม์มิง SCA (Timing SCA) สัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่ถูกคัดเลือกในช่องวิเคราะห์ จะปล่อยสัญญาณลอจิกพัลส์ที่ตำแหน่งเฉพาะ เช่น จุดสูงสุดของสัญญาณ (Peak) จุดตัดศูนย์ (Zero crossover) กรณิพัลส์แบบไบโพลาร์ (Bipolar pulse) และแฟรคชันที่กำหนด (Constant fraction) การทำงานแบบไทม์มิง SCA จึงเหมาะกับระบบวิเคราะห์สเปกตรัมเวลา



รูปที่ 2.13 ระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบช่องเดียวแบบนอนไทม์มิง SCA

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งโหมดการทำงานของระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบช่องเดียวตามลักษณะการทำงานได้ 4 โหมด [8] ได้แก่

1. โหมดอินทิกรัล (Integral mode)

การทำงานของระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบช่องเดียวในโหมดนี้จะปรับตั้งค่าของระดับดิสคริเมเนเตอร์ด้านสูง (ULD) ให้เป็นค่าสูงสุด และคัดเลือกสัญญาณด้วยดิสคริเมเนเตอร์ระดับต่ำ

(LLD) เพียงตัวเดียว สัญญาณลอจิกจะเกิดที่ขอบขาขึ้น มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับการทำงานของอินทิกรัลดิสคริมีเนเตอร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น แตกต่างที่รูปแบบของการเกิดลอจิกพัลส์ที่เอาท์พุทของระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบช่องเดี่ยวจะเกิดที่ขอบขาลงของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ และเมื่อสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์มีขนาดสูงเกินระดับดิสคริมีเนเตอร์ด้านสูงที่เป็นค่าสูงสุดจะไม่มีสัญญาณพัลส์ลอจิกออก แตกต่างกับอินทิกรัลดิสคริมีเนเตอร์ที่ไม่มีการจำกัดการคัดเลือกขนาดสัญญาณด้านสูงสุด

2. โหมดปกติ (Normal mode)

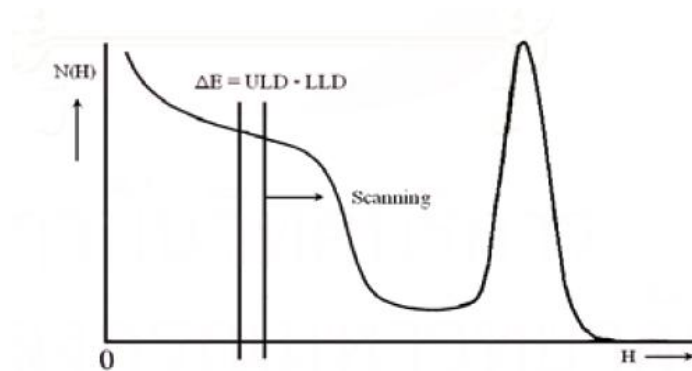
สำหรับการทำงานของระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบช่องเดี่ยวในโหมดนี้ มีการปรับตั้งค่าของ ระดับดิสคริมีเนเตอร์ด้านสูงและระดับดิสคริมีเนเตอร์ด้านต่ำได้อิสระจากกัน จึงทำให้สามารถเลือกกำหนดค่าช่วงพลังงานเฉพาะ (Region of Interest; ROI) ที่ต้องการวิเคราะห์ได้สะดวก แต่ไม่เหมาะกับการใช้วิเคราะห์สเปกตรัมพลังงาน

3. โหมดวินโดว์ (Window mode)

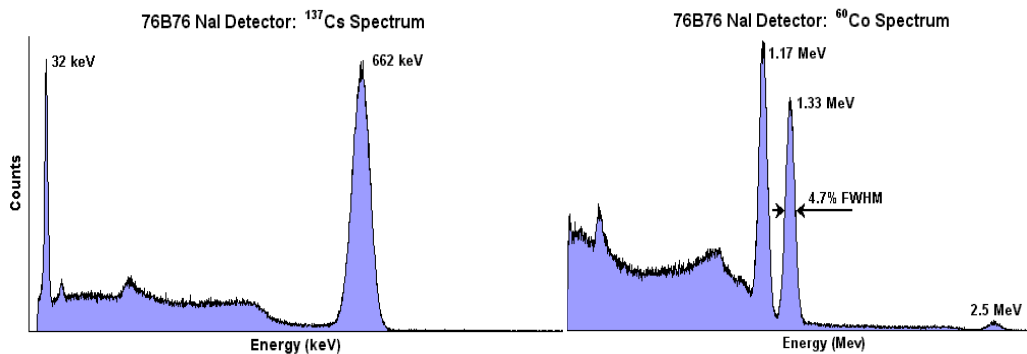
ในส่วนการทำงานของโหมดวินโดว์นั้น การปรับตั้งค่าระดับดิสคริมีเนเตอร์ด้านสูงและระดับดิสคริมีเนเตอร์ด้านต่ำไม่สามารถทำได้อย่างอิสระเหมือนกับโหมดปกติ โดยทั่วไปในการใช้งานจะต้องตั้งค่าความต่างระหว่างระดับดิสคริมีเนเตอร์ด้านสูงและระดับดิสคริมีเนเตอร์ด้านต่ำให้คงที่ไว้ค่าใดค่าหนึ่ง เพื่อใช้เป็นช่องวิเคราะห์ (หน้าต่าง) ซึ่งในการตั้งค่าช่องวิเคราะห์ให้ละเอียดเพียงใดจะต้องสัมพันธ์และเหมาะสมกับความสามารถในการแจกแจงพลังงานของหัววัดรังสีนั้น ๆ ในส่วนของขั้นตอนการเปลี่ยนระดับดิสคริมีเนเตอร์ด้านต่ำสามารถปรับจากระดับต่ำไปสูงได้ครั้งละช่องวิเคราะห์อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นทุกครั้งของการปรับค่าระดับดิสคริมีเนเตอร์ด้านต่ำ ค่าของระดับดิสคริมีเนเตอร์ด้านสูงจะเป็นผลรวมระหว่างระดับดิสคริมีเนเตอร์ด้านต่ำกับค่าความกว้างหน้าต่าง ($ULD = LLD + \Delta E$)

4. โหมดสวீป (Sweep mode)

เป็นโหมดวินโดว์ที่สามารถควบคุมให้ระดับดิสคริมีเนเตอร์ด้านต่ำด้วยการรับสัญญาณกวาด (Sweep) จากอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณภายนอกและส่งสัญญาณลอจิกพัลส์ไปบันทึกยังอุปกรณ์นับในแต่ละระดับของวินโดว์โดยอัตโนมัติเหมาะสำหรับการใช้เป็นระบบวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานของรังสีดังรูปที่ 2.14 ซึ่งอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้นนี้ได้ใช้การทำงานแบบโหมดสวี่ปของวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยวเพื่อแสดงสเปกตรัม ในรูปที่ 2.15 แสดงสเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมาของซีเซียม-137 และ โคบอลต์-60 ที่วัดด้วยหัววัดเรืองรังสีชนิด NaI (TI)



รูปที่ 2.14 การทำงานของระบบวิเคราะห์ความสูงของพัลส์แบบช่องเดี่ยวแบบโหมดสวิตช์



รูปที่ 2.15 สเปกตรัมพลังงานของซีเซียม-137 และ โคบอลต์-60 ที่วัดด้วยหัววัดรังสีชนิด NaI (Tl)

2.6 อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี

โดยทั่วไปเครื่องสำรวจรังสี (Survey meter) มักจะออกแบบให้วัดค่าอัตราปริมาณรังสี อาจแสดงผลในรูปแบบเข็มหรือเป็นหน้าปัดบอกตัวเลข (Analog or digital display) ในปัจจุบัน ผู้ผลิตนิยมเพิ่มฟังก์ชันให้เครื่องสำรวจรังสีสามารถระบุชนิดไอโซโทปที่ทำการตรวจวัดได้ด้วย เรียกว่า อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี (Radioisotope Identification Devices; RIIDs) อุปกรณ์ชนิดใหม่นี้ ได้เข้ามาเป็นอุปกรณ์หลักในการสำรวจรังสีควบคู่กับการบ่งชี้ชนิดไอโซโทปทั้งในด้านความมั่นคงปลอดภัยและการตรวจวัดรังสีในสิ่งแวดล้อม สามารถบอกถึงปริมาณรังสี ระบุชนิดไอโซโทปรังสี ณ สถานที่ตรวจวัดได้ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการวางแผน ควบคุม หรือดำเนินกิจการใด ๆ ไม่ว่าจะในยามปกติ หรือมีเหตุฉุกเฉินทางรังสี และเป็นเครื่องมือที่ออกแบบมาเพื่อระบุชนิดไอโซโทปของวัสดุกัมมันตรังสี โดยการวัดพลังงานของรังสีแกมมาที่ปล่อยออกมา มีการนำมาใช้ในสถานที่ราชการ หน่วยงานต่าง ๆ เช่น กรมศุลกากร ท่าเรือและท่าอากาศยาน เพื่อตรวจสอบ ขัดขวาง การเคลื่อนย้ายของวัสดุ กัมมันตรังสีทั้งแบบถูกและผิดกฎหมาย นอกจากนี้เจ้าหน้าที่ฉุกเฉินทางรังสี นักดับเพลิง และบุคลากรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องก็มีความจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์นี้เพื่อประเมินสถานการณ์ความรุนแรงได้เช่นกัน [3]

2.6.1 การทำงานของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี

ไอโซโทปรังสีส่วนใหญ่จะปล่อยรังสีแกมมาออกมา ดังที่กล่าวแล้วว่ารังสีแกมมาจากการสลายตัวของไอโซโทปจะมีลักษณะและพลังงานเฉพาะของแต่ละไอโซโทปรังสี เมื่อหัววัดรังสีของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีตรวจจับรังสีแกมมาจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่บ่งบอกถึงพลังงานของรังสีแกมมาที่ตรวจพบ จำนวนรังสีแกมมาที่ถูกลบได้ในแต่ละพลังงานจะถูกสร้างเป็นสเปกตรัมพลังงาน โปรแกรมการทำงานที่ผู้ผลิตออกแบบไว้ จะทำการปรับแต่งสเปกตรัมและค้นหาตำแหน่งพีกพลังงาน รวมทั้งอัตราส่วนของรังสีแกมมาที่ตรวจวัดได้ จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการสืบค้นข้อมูลไอโซโทปในฐานข้อมูลระบบ (Isotope library) เพื่อระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่ตรวจพบให้แก่ผู้ใช้งานให้ทราบ ความไวต่อรังสีและความสามารถในการแจกแจงพลังงาน (Energy resolution) ของรังสีแกมมาจึงมีความสำคัญสำหรับอุปกรณ์นี้

2.6.2 หัววัดรังสีสำหรับอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี

หัววัดรังสีสำหรับอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ ได้แก่

1. หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลเตอร์ เป็นผลึกกลุ่มวัสดุเรืองรังสี ซึ่งเมื่อได้รับรังสีแกมมาจะเปล่งแสงออกมาเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีแกมมา จากนั้นจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยหลอดทวีคูณแสง (Photo Multiplier Tube; PMT) ประมวลผลด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง สร้างเป็นสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่มีลักษณะเฉพาะ อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่ใช้หัววัดรังสีนี้จะมีน้ำหนักเบา ราคาประหยัดกว่าเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีอื่น แต่มีความสามารถในการแจกแจงพลังงานต่ำ ในงานสำรวจรังสีทั่วไปอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีส่วนใหญ่จะใช้หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลเตอร์ชนิดผลึก โซเดียมไอโอไดด์เจือด้วยเทลเลียม [NaI (TI)] และวัสดุซินทิลเลเตอร์ที่ค่อนข้างมาใหม่คือ แลนทานัมโบรไมด์เจือด้วยซีเรียม [LaBr₃ (Ce)] ที่มีความสามารถในการแจกแจงพลังงานดีกว่า NaI (TI) 2 เท่า ให้แสงเข้มกว่าแต่ก็มีราคาสูงขึ้นเช่นกัน สำหรับอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปที่พัฒนาขึ้นนี้ จะใช้หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลเตอร์ ชนิดผลึกซีเซียมไอโอไดด์เจือปนด้วยเทลเลียม [CsI (TI)]

2. หัววัดรังสีชนิดกึ่งตัวนำ เป็นหัววัดที่มีโครงสร้างเป็นรอยต่อไดโอด เมื่อบริเวณรอยต่อของหัววัดรังสีชนิดนี้ได้รับรังสีแกมมา จะทำให้เกิดไอออนคู่ของอิเล็กตรอนและโฮล และมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นโดยขนาดของกระแสขึ้นกับพลังงานของรังสีที่เข้ามาทำอันตรกิริยา เนื่องจากหัววัดชนิดนี้ใช้พลังงานในการสร้างคูพาหะประจุต่ำจึงมีความสามารถในการแจกแจงพลังงานดีมาก ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้ ผลึกเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (high purity germanium (HPGe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว สูง 1.2 นิ้ว แต่จำเป็นต้องมีระบบทำความเย็น เช่น ไนโตรเจนเหลว อยู่ด้วยตลอด

การทำงาน จึงมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก ราคาสูงกว่าอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่ใช้หัววัด NaI (TI) ประมาณ 5 เท่า การทำงานจะใช้เวลาน้อยมากแต่ในขณะเดียวกันหากระบบความเย็นยังไม่เต็มประสิทธิภาพ อาจต้องใช้เวลาจนถึง 2 ชั่วโมงเครื่องจึงจะทำงานได้อีกครั้ง หัววัดรังสีชนิดกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่งที่ไม่ต้องการระบบทำความเย็น คือ แคดเมียมซิงค์ เทลลูไรด์ (cadmium zinc telluride; CZT) มีการแยกพลังงานดีกว่า NaI (TI) 2 เท่า แต่ผลึกมีขนาดเล็กจึงมีความไวต่อรังสีน้อยกว่าหัววัดรังสีอื่น จึงไม่เหมาะกับการวัดรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูง อย่างไรก็ตามมีการออกแบบ CZT ที่ใช้ระบบหล่อเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกซึ่งมีความสามารถแจกแจงพลังงานสูงกว่า รูปที่ 2.16 แสดงอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีแบบต่าง ๆ



รูปที่ 2.16 อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีหัววัดชนิดต่าง ๆ

LaBr₃ : Ce (ซ้าย) NaI (TI) (กลาง) และ HPGe (ขวา)

2.6.3 โครงสร้างของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี

อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี ประกอบด้วย หัววัดรังสี ระบบขยายสัญญาณ ระบบวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงาน ระบบแสดงผล มีโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์สเปกตรัมอยู่ภายใน บางชนิดต้องมีระบบหล่อเย็นหัววัดรังสี จะต้องทำงานด้วยแบตเตอรี่ มีความสามารถในการระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่จำเป็นต้องตรวจพิสูจน์ 4 กลุ่ม ได้แก่

1. วัสดุนิวเคลียร์พิเศษ ได้แก่ พลูโตเนียม ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะสูง เนปจูเนียม สามารถนำไปผลิตอาวุธนิวเคลียร์ได้ รวมทั้งวัสดุต้นกำลังที่นำไปแปรสภาพเป็นวัสดุนิวเคลียร์พิเศษ

2. ไอโซโทปรังสีที่ใช้ทางการแพทย์

3. ไอโซโทปรังสีที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม

4. วัสดุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ

การแผ่รังสีนิวตรอนเป็นสิ่งบ่งชี้สำคัญในการระบุชนิดไอโซโทปรังสีในกลุ่มวัสดุนิวเคลียร์พิเศษ ดังนั้นอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีบางรุ่นจึงมีหัววัดนิวตรอน เพื่อให้สามารถวัดนิวตรอนได้อีกด้วย

ซึ่งเป็นการเพิ่มความสามารถในการตรวจจับวัสดุนิวเคลียร์พิเศษ อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีควรร ออกแบบให้สอดคล้องกับมาตรฐาน American National Standards Institute หรือ ANSI N42.34 และ / หรือมาตรฐาน ASTM C1237-99 ซึ่งกำหนดองค์ประกอบต่าง ๆ ขึ้นต่ำที่ยอมรับได้ในการ ตรวจจับรังสีแกมมาและนิวตรอน

อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีส่วนใหญ่มีการรายงานอัตราปริมาณรังสี มีการแจ้งเตือน ด้วยการสั่น เสียง เมื่อเข้าใกล้ต้นกำเนิดรังสี แต่ละผู้ผลิตและรุ่น มีขนาด น้ำหนัก ราคา อายุของ แบตเตอรี่ ขั้นตอนการโอนย้ายข้อมูลเข้าคอมพิวเตอร์ แตกต่างกันไป

2.6.4 ข้อจำกัดของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี

สารกัมมันตรังสีและวัสดุนิวเคลียร์สามารถถูกห่อหุ้มเพื่อกำบังรังสีที่แผ่ออกมาได้ หากปริมาณ รังสีต่ำกว่าขีดจำกัดที่เครื่องสามารถตรวจจับได้ก็ไม่สามารถตรวจจับรังสีได้ หรือตรวจจับได้แต่มี สเปกตรัมที่ผิดเพี้ยนไปจากธรรมชาติทำให้ผลการวิเคราะห์ไม่ถูกต้อง เมื่อมีการกำบังหรืออำพราง โดยเฉพาะวัสดุนิวเคลียร์พิเศษที่ถูกห่อหุ้มเพื่อกำบังรังสีแล้วอาจคิดว่าเป็นต้นกำเนิดรังสีแกมมา พลังงานต่ำ ทำให้รอดพ้นจากการตรวจค้น ยกตัวอย่างเช่น ตะกั่วหนา 1 นิ้วสามารถลดความแรงรังสี ของพลูโตเนียมได้ 1000 เท่า ตะกั่วหนา 0.25 นิ้วก็สามารถลดความแรงรังสีของยูเรเนียมเสริม สมรรถนะสูงได้ 1000 เท่า เช่นกัน หรืออุณหภูมิต่างกันมีผลต่อการปรับเทียบพลังงานของ อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีบางรุ่น ดังนั้นการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์เช่น จากภายในอาคารไปภายนอก อาคารอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการระบุชนิดของไอโซโทปได้เช่นกัน

2.7 ความเสียหายทางนิวเคลียร์และมาตรฐานของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทป

ความเสียหายทางนิวเคลียร์ (Nuclear damage) คือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นหรือเป็นผลมา จากรังสีที่ถูกปล่อยจากต้นกำเนิดรังสี สถานประกอบการทางนิวเคลียร์ เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ กาก กัมมันตรังสี วัสดุนิวเคลียร์ วัสดุกัมมันตรังสี เป็นต้น ซึ่งมีผลทำให้เกิดการบาดเจ็บหรือเสียชีวิตทาง ร่างกาย การสูญเสียหรือเสียหายทางทรัพย์สิน เศรษฐกิจ ค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมหลังถูก ทำลาย ความหวาดกลัวและทัศนคติในแง่ลบต่อค่านิวเคลียร์ ฯลฯ ซึ่งสาเหตุของความเสียหายทาง นิวเคลียร์นั้นมาจาก [9]

1. การทดลองอาวุธนิวเคลียร์

หลังจากที่มีกระเบิดแล้วจะเกิดฝุ่นกัมมันตรังสี (Fall out) ลอยสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศ โลก ซึ่งมีครึ่งชีวิตแตกต่างกันไปหลายระดับ ตั้งแต่ครึ่งชีวิตสั้นมากไม่ถึงวินาที จนถึงเป็นเดือนหรือเป็น

ปี ซึ่งสามารถทำให้เกิดอันตรายได้ การสลายตัวของสารกัมมันตรังสีเหล่านี้ ส่วนใหญ่ให้รังสีบีตาและรังสีแกมมาออกมา

2. การปล่อยหรือการรั่วไหลของสารกัมมันตรังสีจากสถานประกอบการที่ใช้พลังงานนิวเคลียร์และรังสี โดยสถานประกอบการที่ใช้พลังงานนิวเคลียร์ เช่น โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ และจากสถานที่ที่มีการใช้สารกัมมันตรังสี เช่น สถาบันวิจัย โรงพยาบาล หรือโรงงาน อาจมาจากการเผาของเสียที่เป็นอันตรายโดยไม่มีการควบคุม การระเหยเป็นไอปล่อยสู่อากาศ เพลิงไหม้ ความประมาท เลินเล่อ เป็นต้น

3. การขนส่งวัสดุกัมมันตรังสี

อาจเกิดจากมาตรฐานในการขนส่งที่ต่ำ หรือมีไม่เพียงพอ ภาชนะ ถังบรรจุไม่ปลอดภัยเพียงพอ การยึดถังหรือภาชนะไม่แน่นหนาและน้ำหนักบรรทุกมากเกินไป ลักษณะการขับรถและคุณสมบัติของพนักงานขับรถที่คุณภาพต่ำ ไม่ได้รับการฝึกฝนที่เพียงพอสำหรับการขนส่งวัสดุกัมมันตรังสีและวัสดุนิวเคลียร์ ซึ่งรวมถึงการป้องกันไม่ให้สารรังสีสูญหาย ถูกโจรกรรมหรือทิ้งไว้โดยปราศจากการควบคุมดูแลจึงทำให้เกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินทางรังสี ซึ่งเกิดจากการผิดปกติของหีบห่อทำให้มีการปนเปื้อนและรั่วไหลของสารรังสีออกมาจากหีบห่อ

4. เกิดจากธรรมชาติ

วัสดุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เช่น สารกัมมันตรังสีที่เกิดจากปฏิกิริยาของรังสีคอสมิกกับบรรยากาศโลก หรือรังสีคอสมิกจากอวกาศ (ทุกความสูง 300 เมตร จะได้รับรังสีเพิ่มขึ้น 0.03 มิลลิซีเวิร์ต หรือวัสดุกัมมันตรังสีบางชนิดที่เกิดมาพร้อมกับโลก เช่น โพแทสเซียม-40 ซึ่งไม่เป็นอันตรายร้ายแรง

นอกจากนี้ยังมีสาเหตุอื่นอีกเช่น การถูกขโมย แหกหักหรือสูญหายของสารกัมมันตรังสี จากสาธารณภัยต่าง ๆ เป็นต้น

จากสาเหตุและผลกระทบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุฉุกเฉินทางรังสีแล้ว เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการป้องกัน ลดระดับความรุนแรง หรือบรรเทาผลกระทบที่เกิดขึ้นให้อยู่ในวงจำกัด

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า เราใช้ไอโซโทปรังสีในกิจการต่าง ๆ มากมาย อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปจึงมีผู้ผลิตในเชิงพาณิชย์แพร่หลายเช่นกัน อย่างไรก็ตามการที่จะบอกว่าเครื่องมือชิ้นนั้น ๆ จะต้องระบุไอโซโทปใดได้บ้าง ผู้ผลิตจะต้องยึดปฏิบัติตามมาตรฐาน American National Standards Institute หรือ ANSI N42.34 ว่าด้วยเรื่องของ เกณฑ์การปฏิบัติสำหรับเครื่องมือแบบพกพาเพื่อการตรวจวัดและระบุชนิดไอโซโทปรังสี

สำหรับอุปกรณ์ที่สามารถระบุไอโซโทปรังสีได้นั้น จะต้องมีมาตรฐานทั่วไปดังนี้ [10]

1. แม้ว่าเครื่องจะทำการตรวจจับสนิทได้แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นไอโซโทปได้ หน้าจอแสดงผลจะต้องระบุว่า Not identified หรือ ไม่สามารถระบุได้

2. ขณะทำการตรวจวัดเครื่องจะต้องบอกได้ว่า ณ ที่ทำการตรวจมีความแรงรังสีมากไปหรือน้อยไป

3. บนหน้าจอแสดงผลควรมีเลขความเชื่อมั่น อาจจะเป็นตัวเลข 0-10 ซึ่ง 10 เทียบได้กับ 100 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าการระบุชนิดไอโซโทปรังสีครั้งนี้มีความถูกต้อง แม่นยำ เพียงใด

4. เมื่อทำการทดสอบกับไอโซโทปรังสีที่ไม่ได้อยู่ในชุดฐานข้อมูล (library) ของเครื่อง หน้าจอแสดงผลจะต้องระบุว่า Not identified หรือ ไม่สามารถระบุได้ และ library ของไอโซโทปรังสีนั้นอาจสามารถลบชั่วคราวได้เพื่อทำการทดสอบยืนยันได้

5. ทดสอบกรณีเครื่องไม่สามารถระบุชนิดไอโซโทปได้เพราะรังสีพื้นหลัง (Background) สูงเกินไปทำให้ค่าที่ได้จากการวัดจริงน้อยลง ด้วยการวัด Background ก่อนใช้งานจริง โดยสถานที่นั้นจะต้องมี Background ไม่เกิน 25 ไมโครเร็นต์เกนต์ต่อชั่วโมง ถ้าเครื่องยังระบุว่าพบ โพแทสเซียม-40 ให้นำเครื่องนั้นวัด Background ในกล่องหรืออุปกรณ์ใด ๆ ที่กำบังรังสีเพื่อลดปริมาณรังสีในธรรมชาติลง ทำซ้ำ 10 ครั้ง หากไม่พบไอโซโทปรังสีอื่นยกเว้นรังสีในธรรมชาติจำนวน 9 ใน 10 ครั้งถือว่าใช้งานได้

6. อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีควรระบุชนิดไอโซโทปรังสีได้อย่างน้อย 20 ชนิด ได้แก่ อะเมริเซียม-241 แบริียม-133 โคบอลต์-57 โคบอลต์-60 ซีเซียม-137 แกลเลียม-67 ไอโอดีน-131 อิริเดียม-192 โพแทสเซียม-40 เทคนีเซียม-99เอ็ม แทลเลียม-201 เรเดียม-226 ทอเรียม-232 ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 พลูโตเนียม-239 ยูเรเนียมด้อยสมรรถนะ ยูเรเนียมเสริมสมรรถนะสูง พลูโตเนียมชนิดผลิตอาวุธ และพลูโตเนียมที่ผลิตจากเครื่องปฏิกรณ์

นอกจากนี้ผู้ผลิตอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีในเชิงพาณิชย์ ยังพัฒนาขีดความสามารถของอุปกรณ์อย่างต่อเนื่องซึ่งแต่ละรุ่นจะมีความสามารถแตกต่างกันออกไป เช่น

- การเชื่อมต่อกับสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย (WIFI) บลูทูธ (Bluetooth)
- การปรับเทียบด้วยวิธีที่มีสารรังสีมาตรฐานอยู่ภายในหรือปรับเทียบกับปริมาณรังสีพื้นหลัง
- ระบบปฏิบัติการของคอมพิวเตอร์ที่สามารถเชื่อมโยงกับอุปกรณ์
- ความจุของหน่วยความจำภายในเครื่อง
- หน้าจอชนิดสัมผัส (Touch screen) เป็นต้น

อย่างไรก็ดียังมีสิ่งที่คุณผลิตต้องทำออกมาเหมือนกันหมดเป็นมาตรฐานในทุกเครื่อง นั่นคือการแสดงหมวดหมู่ของไอโซโทปรังสีบนหน้าจอแสดงผลเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถจัดการหรือจำแนกเบื้องต้นได้ รายชื่อไอโซโทปรังสีที่อยู่ใน library ของอุปกรณ์จำแนกตามหมวดหมู่มีดังนี้

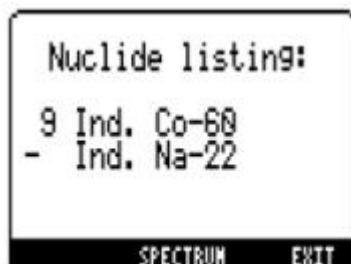
1. ไอโซโทปรังสีที่จัดเป็นวัสดุนิวเคลียร์พิเศษ จะแสดงผลว่า SNM ได้แก่ Enriched Uranium, HEU, U-232, U-233, U-235, U-238, Pu-239, Pu-238, Pu-240 และ Np-237

2. ไอโซโทปรังสีที่ใช้ในทางการแพทย์ มักเป็นไอโซโทปที่ใช้ในงานรังสีวินิจฉัย รังสีรักษาและเวชศาสตร์นิวเคลียร์ จะแสดงผลว่า MED ได้แก่ F-18, I-125, Lu-177, Lu-177m, Mo-99, Pd-103, Se-75, Sm-153, Tc-99m, Xe-133, Ac-225, As-74, Ce-139, Ce-141, Co-58, Ga-67, Ga-67 (shielded), Ge-68/Ga-68, I-123, I-124, I-131, In-111, Lu-172, Na-24, Rb-83, Rb-86, Ru-106/Rh-106, Sc-46, Sr-82/Rb-82, Sr-89, Tl-201, Tl-204, Tm-170, V-48, Xe-133m, Yb-169, Zn-62, Zn-65 และ Zr-95

3. ไอโซโทปรังสีที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม จะแสดงผลว่า IND ได้แก่ Am-241, Cs-137, Ho-166m, Ir-192, W-187, Ac-227, Ag-110m, Ar-41, As-72, Au-198, Ba-133, Ba-140, Be-7, Bi-212 (Th-232/U-232 daughter), Br-77, Ca-47, Cd-115, Ce-144, Cm-242, Cm-243, Cm-244, Co-55, Co-57, Co-60, Cs-134, Hf-181, Hg-203, I-126, I-132, I-133, I-134, I-135, Kr-87, Kr-88, Mn-52, Mn-56, Na-22, Nb-92m, Nb-94, Nb-95, Nb-96, Nd-147, Pa-231, Pb-203, Pr-144, Ra-223, Rh-105, Ru-103, Ru-97, Sb-124, Sb-125, Sb-127, Sr-85/Kr-85, Tc-96, Te-132, Th-229, Th-230, Tm-171 และ W-188/Re-188

4. ไอโซโทปรังสีที่พบในธรรมชาติ มักพบในปุ๋ย เซรามิกส์ ลวดเชื่อม เป็นต้น จะแสดงผลว่า NORM ได้แก่ La-138, Ra-226, Bi-214 (Ra-226 daughter), K-40, Lu-176 และ Th-232

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีบางรุ่นที่แสดงผลว่า RDD ซึ่งย่อมาจาก radiological dispersal device คือ วัสดุกัมมันตรังสีไม่ว่าทางการแพทย์หรืออุตสาหกรรม ที่อุปกรณ์ตรวจวัดความแรงแล้วมีค่ามากกว่า 100 มิลลิคูรี ซึ่งสามารถนำไปประกอบกับวัตถุระเบิดใด ๆ กลายเป็นระเบิดรังสีหรือระเบิดสกปรก (Dirty bomb) ทำให้เกิดการเปื้อนทางรังสี



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการแสดงผลของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี

ตัวอย่างการแสดงผลของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี identiFINDER NGH ของบริษัท ICX Technologies แสดงดังรูปที่ 2.17 ซึ่งพบโคบอลต์-60 ที่ระดับความเชื่อมั่น 9 จาก 10 เป็นไอโซโทปรังสีที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม และอาจพบโซเดียม-22 ด้วยเช่นกัน

ในฐานะที่ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประชาคมโลกและเป็นสมาชิกของ IAEA จึงมีหน้าที่ปฏิบัติตามข้อมติต่าง ๆ ของ IAEA และปฏิบัติตามสนธิสัญญา อนุสัญญา ที่ได้ลงนามและให้สัตยาบันไว้ รวมทั้งปฏิบัติตาม ระเบียบและมาตรการต่าง ๆ ที่ออกโดย IAEA ซึ่งหน้าที่หลัก 3 ด้านเพื่อสร้างความมั่นใจให้กับประชาคมโลกว่า การใช้พลังงานนิวเคลียร์เป็นไปด้วยความเรียบร้อยปลอดภัย ได้แก่

- การตรวจพิทักษ์ความปลอดภัย (safeguards) และการตรวจพิสูจน์นิวเคลียร์ (verification) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้างความมั่นใจว่า โครงการนิวเคลียร์ของประเทศ เป็นไปเพื่อประโยชน์ในทางสันติจริง ไม่ได้มีวัตถุประสงค์แอบแฝงในการสร้างอาวุธนิวเคลียร์

- ความปลอดภัย (safety) และความมั่นคง (security) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้างความมั่นใจว่าการปฏิบัติการงานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนิวเคลียร์ วัสดุกัมมันตรังสี จะต้องเป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัย มีระบบที่ดีเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้ผู้ก่อการร้ายลักลอบขนย้ายวัสดุนิวเคลียร์เพื่อนำไปใช้ในทางไม่พึงประสงค์ ดังนั้นอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปที่พัฒนาขึ้นจึงมีส่วนสำคัญ ในการตรวจสอบ ป้องกันให้การดำเนินกิจการที่เกี่ยวข้องกับนิวเคลียร์เป็นไปด้วยความปลอดภัยและเพื่อป้องกันมิให้ผู้ปฏิบัติงาน ประชาชน และสิ่งแวดล้อม ได้รับผลกระทบที่เป็นอันตรายจากรังสี

2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

เป็นไอซี (IC: Integrated Circuit) ที่สามารถโปรแกรมการทำงานได้ซับซ้อน สามารถรับ/ส่งข้อมูลในรูปสัญญาณดิจิทัลเข้าไปทำการประมวลผลแล้วส่งผลลัพธ์ข้อมูลดิจิทัลออกมาเพื่อนำไปใช้งานตามที่ต้องการได้ ภายในชิปไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU: Central Processing Unit) หน่วยความจำ และพอร์ตบรรจุอยู่ ซึ่งอาจจะเรียกได้ว่าเป็นคอมพิวเตอร์ชิปเดี่ยว ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับการพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในวงจรทางด้านงานควบคุม แทน

ไมโครโปรเซสเซอร์ที่เวลาใช้งานจะต้องต่อวงจรภายนอกต่าง ๆ เพิ่มเติม เช่น หน่วยความจำส่วนอินพุท/เอาต์พุท วงจรตั้งเวลา วงจรสื่อสารข้อมูล และ วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล เป็นต้น จึงจะสามารถใช้ในงานควบคุมและปฏิบัติการได้เช่นเดียวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ กล่าวโดยสรุปคือ

Microcontroller \longrightarrow Microprocessor + Memory + I/O + Peripherals

ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยมักจะเป็นการนำไปใช้ฝังในระบบของอุปกรณ์อื่น ๆ (Embedded Systems) เพื่อใช้ควบคุมการทำงาน เช่น ใช้ในรถยนต์ เต้าปอมไมโครเวฟ เครื่องซักผ้าอัตโนมัติ และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ เป็นต้น เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์มีข้อดีเหมาะสมต่อการใช้งานควบคุมหลายประการ เช่น

- ชิพไอซีและระบบที่ได้มีขนาดเล็กกว่าการใช้ชิพไมโครโปรเซสเซอร์
- มีราคาประหยัด
- วงจรที่ได้จะมีความซับซ้อนน้อย ช่วยลดข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในการต่อวงจร
- มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับงานควบคุมโดยเฉพาะทำให้ใช้งานง่าย
- ช่วยลดระยะเวลาในการพัฒนาระบบได้

ไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลายผู้ผลิต หลายตระกูล และหลายเบอร์ ซึ่งแต่ละเบอร์ก็จะมีโครงสร้างภายในและความสามารถในการทำงานหรือมีส่วนสนับสนุนในตัวที่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้กับงานได้อย่างเหมาะสม ปัจจุบันไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำการเชื่อมต่อกับระบบของคอมพิวเตอร์ทั่วไปได้อีกด้วย ดังนั้นการสั่งงานอาจจะเป็นการสั่งงานอยู่คนละที่ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตก็ทำได้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลต่าง ๆ ที่ได้รับความนิยมและมีพัฒนาการมาจนถึงปัจจุบันมีดังนี้

1. ไมโครโปรเซสเซอร์ Z-80 เป็นตัวแรกที่เป็นลักษณะของ CPU ไม่ถึงขั้นเรียกว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นลักษณะของ CPU เล็ก ๆ ที่ต้องอาศัย I/O ต่าง ๆ เพิ่มเติมเข้ามา จึงทำให้บอร์ดมีขนาดค่อนข้างใหญ่ จัดได้ว่าเป็นการเริ่มต้นการเรียนรู้ของยุคสมัยนั้น

2. MCS-51 บริษัทที่สร้างไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 เป็นบริษัทแรก คือ บริษัท Intel ตระกูล MCS-51 เป็นตระกูลที่พัฒนาต่อจาก Z80 ทำให้การศึกษาเรียนรู้ไมโครคอนโทรลเลอร์ง่ายขึ้นกว่าเดิม ไม่ว่าจะเป็นการเขียนโปรแกรมในลักษณะของ Assembly Code แล้วโหลดลงบอร์ดเพื่อใช้งาน ตลอดจน สถาปัตยกรรมในการออกแบบ ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นนี้จะช่วยลดอุปกรณ์รอบข้างลงไปได้มาก

3. AVR เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นต่อมาที่มีการพัฒนาต่อมาจาก MCS-51 โดยบริษัท ATMEAL เนื่องจาก MCS-51 ยุคหลังนี้ไม่ค่อยมีคนใช้งานจริง และมีใช้งานแต่เฉพาะในสถาบันการศึกษา เนื่องจากการออกแบบวงจรที่ค่อนข้างยุ่งยาก และต้องอาศัยการต่ออุปกรณ์ร่วมจำนวนมากนั่นเอง ดังนั้น AVR จึงเข้ามาเป็นที่นิยมในการทำงาน โดยคุณสมบัติหลักที่น่าสนใจ คือสามารถเชื่อมโยงสัญญาณผ่านพอร์ตยูเอสบี (USB) ได้โดยตรง ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ยุคเก่าทำได้โดยต้องผ่านพอร์ต RS-232 แต่เนื่องด้วยคอมพิวเตอร์ยุคใหม่ พอร์ต RS-232 เริ่มหายาก ดังนั้น AVR จึงได้รับความนิยม

4. Arduino เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดแบบสำเร็จรูปในยุคปัจจุบัน ซึ่งถูกสร้างมาจาก Controller ตระกูล ARM ของ ATMEAL ข้อดีของไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด คือ เรื่องของ Open Source ที่สามารถนำไป พัฒนาต่อเป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้และความสามารถในการเพิ่ม Boot Loader เข้าไปที่ตัว ARM จึงทำให้การ Upload Code เข้าตัวบอร์ดสามารถทำได้ง่ายขึ้น และยังมีการพัฒนา Software ที่ใช้ในการควบคุมตัวบอร์ด ของ Arduino มีลักษณะเป็นภาษา C++ ที่โปรแกรมเมอร์มีความคุ้นเคยในการใช้งาน ตัวบอร์ดสามารถนำโมดูลมาต่อเพิ่ม ซึ่งทาง Arduino เรียกว่าเป็น shield เพื่อเพิ่มความสามารถให้มากขึ้น

5. Raspberry Pi เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ Board ยุคนี้เช่นเดียวกัน ใช้ Controller ตระกูล ARM เช่นกัน ที่น่าสนใจสำหรับบอร์ด Raspberry Pi คือ การจำลองตัวมันเองให้เป็นระบบคอมพิวเตอร์เครื่อง เล็ก ๆ เครื่องหนึ่ง ที่สามารถรันระบบ Linux ได้ในตัว นั่นก็หมายถึงการดึงระบบต่าง ๆ เพื่อมาใช้งานใน board ทำให้มีความสะดวกมากเพราะมี OS Linux ทำงานให้แทนอยู่แล้ว อย่างเช่นการติดต่อกับระบบ Network การติดต่อกับระบบจอภาพ การติดต่อกับระบบเสียง ตลอดจนการติดต่อกับระบบการเก็บข้อมูลผ่าน SD Card ซึ่งสามารถทำได้ครบและครอบคลุม ด้วยระบบปฏิบัติการ Linux ที่รันอยู่บนตัวบอร์ด Raspberry Pi

6. PIC บริษัท Microchip Technology เป็นผู้สร้างและผลิต PIC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ยุคต่อมาที่ได้รับความนิยมสูงอีกตระกูลหนึ่ง ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลนี้ มีการพัฒนาเทคโนโลยีขึ้นในทุกด้าน ทำให้ได้รับความนิยมกว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ยุคเก่า เพราะในเรื่องของอุปกรณ์ต่อพ่วงที่มีน้อย ประกอบกับมีหน่วยความจำ EEPROM ในตัว จึงทำให้ง่ายต่อการบันทึกและจัดเก็บข้อมูล สามารถต่อออกมาใช้งานภายนอกได้โดยตรง มีกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่เพียงพอ และอีกความสามารถหนึ่ง คือ สามารถโปรแกรมตัว Boot Loader เข้าไปในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ จึงทำให้ง่ายในการโหลดโปรแกรมเข้าไปจากคอมพิวเตอร์โดยผ่านทาง Serial Port และกดปุ่ม Reset เพียงอย่างเดียวไม่ต้องการเครื่องโปรแกรม IC เพิ่มเติม อย่างที่ต้องมีกับระบบไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นเก่าอย่าง MCS-51 [11]

คุณลักษณะทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC มีดังนี้

ก) ชนิดของหน่วยความจำ

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

ข) จำนวนขาอินพุต – เอาต์พุต

- มีจำนวนขาตั้งแต่ 4 ขา จนถึงมากกว่า 120 ขา

ค) คุณสมบัติอื่น ๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์

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

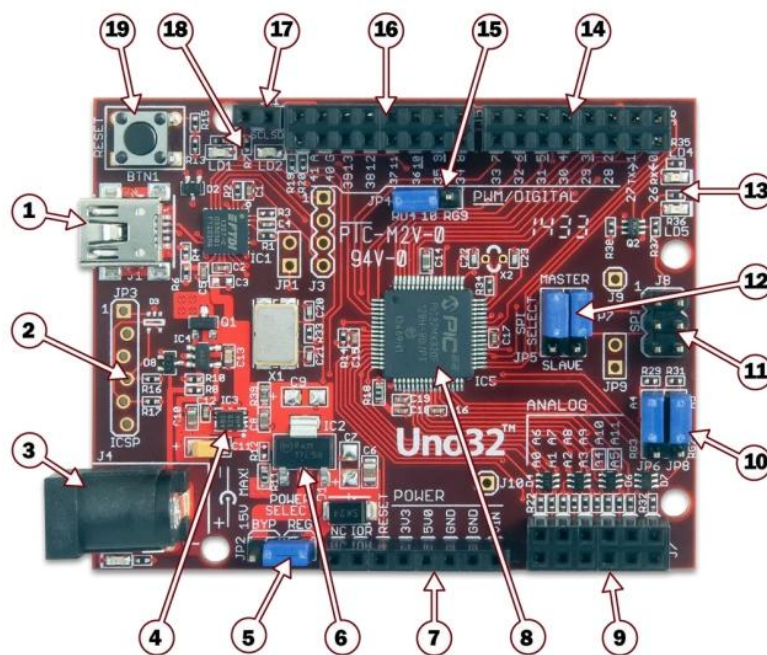
1. EC ใช้สัญญาณนาฬิกาจากภายนอก
2. ER ใช้ตัวต้านทาน
3. INTRC ใช้ตัวต้านทานและคาปาซิเตอร์ร่วมกับสัญญาณนาฬิกาภายใน PIC เอง
4. LP ใช้คริสตอลพลังงานต่ำ ความถี่สูงสุดไม่เกิน 200 kHz
5. XT ใช้คริสตอล ความถี่ตั้งแต่ 100 kHz – สูงสุดไม่เกิน 4 MHz
6. HS ใช้คริสตอลความถี่สูงสุดไม่เกิน 20 MHz

- ดิจิตอล I/O พอร์ต
- มีช่องอนาล็อกอินพุต
- มีโมดูลเปรียบเทียบแรงดันอนาล็อก
- มีไทมเมอร์ภายในตัว
- ตอบสนองแหล่งกำเนิดการอินเทอร์รัปต์ (Interrupt) ได้ทั้งภายในและภายนอก
- 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

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์ระบบชนิดไอโซโทปริงสีเพื่อทำการสวิตช์ (Sweep) ของวงจรวิเคราะห์สัญญาณแบบช่องเดียว เป็นรุ่น ChipKIT UNO 32 ที่มีพื้นฐานเดียวกับ Arduino และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานด้วย PIC32 มีขาควบคุมสัญญาณต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.18 สั่งงานด้วยโปรแกรม MPIDE



รูปที่ 2.18 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ChipKIT UNO32

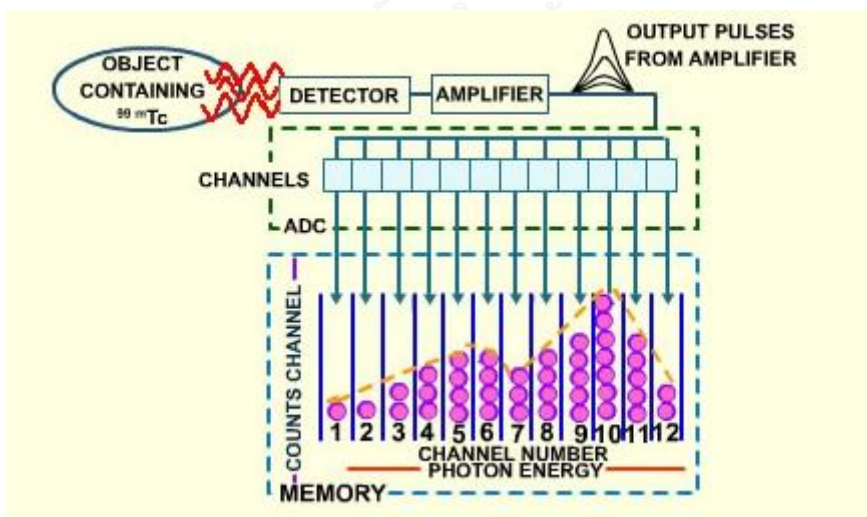
จากรูปที่ 2.18 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ChipKIT UNO32 หน้าที่แตกต่างกันดังนี้

1. พอร์ต USB สำหรับเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อจ่ายไฟเลี้ยงให้บอร์ดและโปรแกรม
2. Debug tool สำหรับโปรแกรมตรวจสอบจุดบกพร่อง
3. พอร์ตสำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาด 7 ถึง 15 โวลต์
4. อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาด 3.3 โวลต์ 500 มิลลิแอมป์แอมป์
5. Power Jumper
 - BYP ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าภายนอกโดยไม่ผ่านอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า โดยแหล่งจ่ายไฟภายนอกต้องมีแรงดันสูงสุดไม่เกิน 6 โวลต์
 - REG ใช้ไฟเลี้ยง 5 โวลต์ผ่านอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า
6. อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาด 5 โวลต์ 800 มิลลิแอมป์แอมป์
7. Power Connector ใช้เป็นอินพุตหรือเอาต์พุตของแหล่งจ่ายไฟ
8. ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC32MX320F128H เป็นหน่วยประมวลผลหลักของบอร์ดนี้

9. พอร์ต ADC ใช้ในการรับและส่งข้อมูล
10. JUMPER เลือกสัญญาณ อนุพัทธ์อินพุตหรือ I²C
11. พอร์ตสำหรับการเชื่อมต่อแบบ Serial Peripheral Interface (SPI)
12. JUMPER เลือก Master หรือ Slave สำหรับการเชื่อมต่อแบบ SPI
13. LED 2 ดวง ต่อกับสัญญาณดิจิทัลที่ต่อกับ Pin ที่ 13 และ 43
14. พอร์ตสำหรับสัญญาณดิจิทัลใช้ในการรับและส่งข้อมูล
15. JUMPER เลือกสัญญาณการทำงานแบบ pulse width modulator (PWM) หรือ SPI
16. พอร์ตสำหรับสัญญาณดิจิทัลใช้ในการรับและส่งข้อมูล
17. พอร์ตสำหรับการเชื่อมต่อชนิด I²C
18. หลอด LED แสดงสถานะการเชื่อมต่อกับ USB
19. ปุ่ม Reset

2.9 การแสดงสเปกตรัมและระบุชนิดไอโซโทปรังสี

โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ที่สามารถแสดงสเปกตรัมและระบุชนิดไอโซโทปรังสีได้ มักใช้ในงานวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงาน ระบบการทำงานจะเป็นระบบวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer; MCA) ต่อเชื่อมเข้ากับระบบวัด ซึ่ง MCA มีขีดความสามารถทั้งในด้านความเร็ว การเก็บข้อมูลความละเอียดของการแสดงระดับพลังงาน สามารถบันทึกข้อมูลจำนวนรังสีแต่ละระดับพลังงาน ที่ตกกระทบหัววัดได้โดยอัตโนมัติ แล้วแสดงสเปกตรัมที่จอแสดงผล โดยไม่จำเป็นต้องนำข้อมูลไปเขียนกราฟ MCA มีส่วนประกอบที่สำคัญแสดงในภาพที่ 2.19



รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของอุปกรณ์วิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง
ที่มา Pulse height analyzer, PHY232 Nuclear Medicine Instrumentation,
Charles Sturt University.

โดยสัญญาณพัลส์จากหัววัดรังสีที่ผ่านวงจรขยายสัญญาณแล้ว จะเป็นสัญญาณพัลส์ทางเข้าของวงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to digital Converter; ADC) ความสูงของสัญญาณอนาล็อกจะถูกตรวจวัดและเปลี่ยนเป็นรหัสแอดเดรสของหน่วยความจำ แล้วส่งข้อมูลไปยังวงจรเลือกตำแหน่งช่อง (Channel address register) เพื่อเลือกตำแหน่งช่องในหน่วยความจำให้ตรงกับขนาดสัญญาณพัลส์ทุกครั้งที่มีการเลือกตำแหน่งช่อง หน่วยความจำจะทำการเพิ่มข้อมูลผ่านวงจรบันทึกข้อมูล (Data register) โดยจะทำหน้าที่บันทึกจำนวนครั้งของสัญญาณที่เกิดขึ้นในแต่ละช่อง ข้อมูลที่อยู่ในความหน่วยความจำจะถูกส่งไปแสดงผลเป็นสเปกตรัมพลังงานรังสีตลอดเวลาที่เครื่องทำงานอยู่ และอาจแสดงผลไปยังอุปกรณ์ที่เชื่อมโยงกับระบบเช่น เครื่องพิมพ์ เครื่องเขียนกราฟ

กล่าวคือหมายเลข Channel ของพีคจะเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีแกมมา ดังสมการ

$$E = aC \dots\dots\dots (6)$$

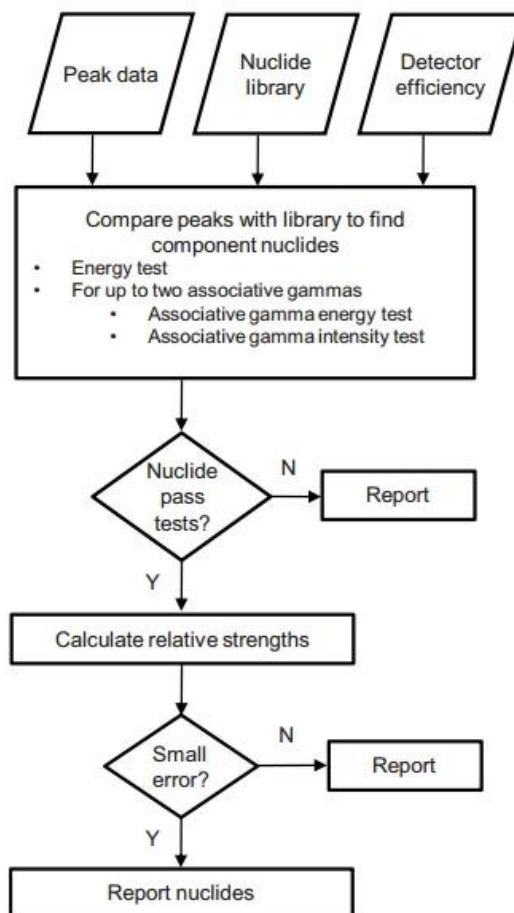
เมื่อ E แทนพลังงานของรังสีแกมมา

C แทนหมายเลข Channel ตรงตำแหน่งกลางพีค

a แทนค่าคงที่

ดังเช่น หากเลือกพลังงานของรังสีแกมมาที่จะวิเคราะห์ได้สูงสุดคือ 2000 keV มี DAC ขนาด 10 บิตหรือ 1024 Channel หากต้องการให้ที่พลังงาน 2000 keV ตรงกับ Channel ที่ 950 ค่า a จะอยู่ที่ $2000 \text{ keV} / 950 = 2.1 \text{ keV}$ ต่อ Channel [12]

โดยทั่วไปขั้นตอนวิธี (Algorithm) ของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปในการค้นหาตำแหน่งพีคพลังงานและสืบค้นข้อมูลระบุชนิดไอโซโทป จะใช้วิธีการปรับเทียบพลังงานกับจำนวน Channel แล้วปรับแต่งข้อมูลบนสเปกตรัม หากจุดยอดของพีค หากตำแหน่งกลางพีคอยู่ที่ Channel ใด ก็จะนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง และแสดงพลังงาน ณ ตำแหน่งนั้น ซึ่งหากตรงกับข้อมูลไอโซโทปใน library แล้วก็จะแสดงผลไอโซโทปนั้นออกมา



รูปที่ 2.20 Algorithm ของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปที่ Michael T. Batdorf et al. พัฒนาขึ้น
ที่มา Isotope Identification in the GammaTracker Handheld Radioisotope Identifier
Michael T. Batdorf, et al, 2009

ตัวอย่าง Algorithm สำหรับอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปที่ Michael T. Batdorf et al. พัฒนาขึ้นแสดงในรูปที่ 2.20 เมื่อได้รับสเปกตรัมแล้ว จะมี Library ของไอโซโทปและข้อมูลประสิทธิภาพของหัววัดรังสีเพื่อเปรียบเทียบพลังงาน ความเข้มของรังสีและมีการคำนวณความผิดพลาด หากอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ก็จะแสดงผลออกมา

อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าจะสเปกตรัมพลังงานของรังสีจะได้อมาด้วยการทำงานของระบบวิเคราะห์แบบหลายช่อง (MCA) หรือ ระบบวิเคราะห์แบบช่องเดี่ยว (SCA) ส่วนของ Algorithm ในการระบุชนิดของไอโซโทปรังสีจะเหมือนกัน

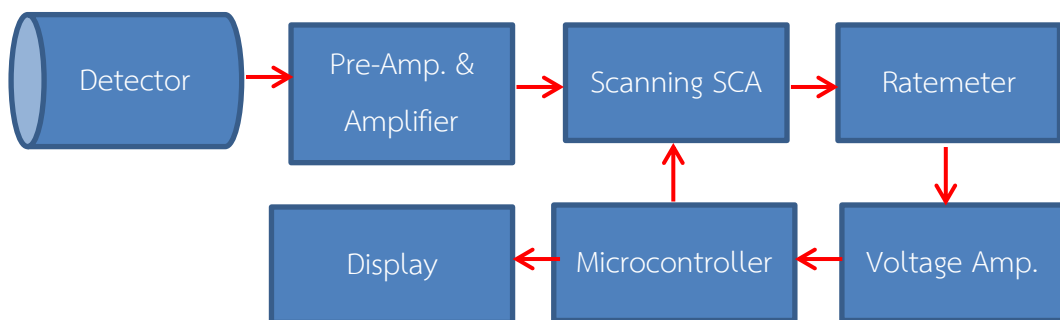
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

3.1 ข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ระบบอัตโนมัติไอโซโทป

3.1.1 ข้อมูลพื้นฐานของอุปกรณ์ระบบอัตโนมัติไอโซโทป

อุปกรณ์ระบบอัตโนมัติของไอโซโทปที่พัฒนาขึ้นนี้ เลือกใช้หัววัดรังสีซีเอ็มไอโอไอโอดีเจ็อบน ด้วยทลเลียมทำงานร่วมกับระบบวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยวซึ่งมีราคาประหยัด แต่เนื่องจาก ต้องใช้เวลาในการวัด ระบบได้ถูกออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา และสะดวกสบายต่อ ผู้ใช้งาน สามารถวัดสเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาและระบบอัตโนมัติของไอโซโทปรังสีได้ในเครื่อง เดียวกัน เพื่อลดการใช้ฮาร์ดแวร์ (Hardware) จึงอาศัยการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ พร้อม พัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงานและประมวลข้อมูลจากระบบวัดรังสี

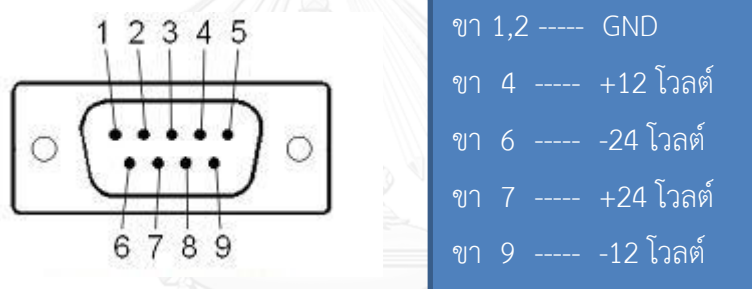
สัญญาณพัลส์จากหัววัดรังสีผ่านวงจรขยายส่วนหน้าจะถูกส่งให้ระบบขยายและแต่งรูป สัญญาณที่พัฒนาขึ้น จากนั้นสัญญาณพัลส์ที่ได้รับการขยายสัญญาณจะป้อนเข้าสู่วงจรวิเคราะห์ พลังงานแบบช่องเดี่ยว ซึ่งควบคุมการทำงานเพื่อสแกนสเปกตรัมพลังงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยติดต่อข้อมูลแบบอนุกรม ชนิด Inter Integrate Circuit Bus (I²C) สัญญาณลอจิกพัลส์จะถูกส่ง เข้าสู่วงจรถมิตเตอร์และวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาดสัญญาณ 0 ถึง 3.3 โวลต์ตามสัดส่วนความถี่ ของพัลส์ ก่อนส่งเข้าสู่การแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) บนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อนำไปแสดงผลสเปกตรัมบนหน้าจอภาพสีหลังตรวจวัดเสร็จสิ้นและสามารถระบบอัตโนมัติของไอโซโทป รังสีได้ด้วยการเลื่อนตัวชี้ตำแหน่ง (Cursor) ไปยังจุดกึ่งกลางของโฟโตฟิก แผนภาพการทำงานของ อุปกรณ์ระบบอัตโนมัติของไอโซโทปที่พัฒนาขึ้นแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์ระบบอัตโนมัติของไอโซโทปที่พัฒนาขึ้น

3.1.2 ข้อมูลพื้นฐานสำหรับระบบวัดส่วนหน้า

หัววัดรังสีที่เลือกใช้ในอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปนี้ เป็นหัววัดเรืองรังสีประเภทผลึกอินทรีย์ชนิดซีเซียมไอโอไดด์เจือทาลเลียม (CsI (Tl)) ขนาด 1 ลบ.ซม. เชื่อมต่อกับซิลิกอนโฟโตไดโอดชนิดพินและวงจรขยายส่วนหน้าชนิดไวต่อประจุหรือแปลงประจุเป็นแรงดันไฟฟ้าของบริษัท Hamamatsu รุ่น H4083 โดยโฟโตไดโอดชนิดพินเป็นของบริษัท Hamamatsu รุ่น H3590-08 ที่มีคุณสมบัติไวต่อการตอบสนองแสง มีความเสถียรสูงและมีพื้นที่ไวต่อแสง (Photosensitive area) ขนาด 10x10 มิลลิเมตร สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากซิลิกอนโฟโตไดโอดชนิดพินที่ไบอัสด้วยแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ ผ่านวงจรแปลงประจุเป็นแรงดันไฟฟ้ามีอัตราขยาย 10 mV/MeV ถึง 20 mV/MeV โดยหัวต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าของระบบวัดส่วนหน้าเลือกใช้ชนิด DB9 ตัวผู้ มีการกำหนดตำแหน่งขาต่อแหล่งจ่ายไฟดังรูปที่ 3.2 สัญญาณพัลส์จากระบบวัดส่วนหน้าจะถูกส่งไปวงจรขยายสัญญาณพัลส์ต่อไป



รูปที่ 3.2 หัวต่อ DB9 ตัวผู้ของหัววัดรังสีซึ่งต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ขนาดแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ

3.1.3 ข้อมูลพื้นฐานสำหรับส่วนประมวลผลและแสดงผล

ส่วนประมวลผลข้อมูลเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ChipKIT UNO 32 ซึ่งผลิตโดยบริษัท DILIGENT ในการควบคุมการแปรเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าของ LLD ในวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดียว ด้วยโปรแกรม Multi-Platform Integrated Development Environment (MPIDE) และรับสัญญาณแรงดันอนาล็อกอินพุตสูงสุด 3.3 โวลต์ จากวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าและมีชิพประมวลผลรุ่น PIC32MX320F128H ของบริษัทไมโครชิพเป็นหน่วยประมวลผลหลัก เชื่อมต่อกับหน้าจอแสดงผลแอลซีดีขนาด 4.3 นิ้ว กว้าง 10.1 ซม. ยาว 6.2 ซม.

3.2 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสี

3.2.1 การคัดเลือกช่วงพลังงานของต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่สามารถระบุชนิดไอโซโทปรังสีได้

จากข้อมูลขององค์การวิจัยนิวเคลียร์แห่งทวีปยุโรป (The European Organization for Nuclear Research) หรือ เซิร์น (CERN) ที่เผยแพร่ในหนังสือ Introduction to Radiation Protection ของ Grupen, Claus พบว่าไอโซโทปรังสีที่สลายตัวให้รังสีแกมมาและใช้งานอยู่เป็นประจำทั่วโลก มีทั้งสิ้น 47 ไอโซโทป ครอบคลุมในช่วงพลังงาน 0.006 ถึง 1.6 MeV

จากข้อมูลศูนย์กลางข้อมูลด้านนิวเคลียร์ของ Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) ประเทศเกาหลีใต้ พบว่า จากไอโซโทปรังสีทั้งหมด ไอโซโทปรังสีที่สลายตัวให้รังสีแกมมาที่มีครึ่งชีวิตมากกว่า 1 วัน และมีพลังงานมากกว่า 2 MeV เพียง 2 ไอโซโทปคือ อิริเดียม-188 และ บิสมัท-208

จากเว็บเพจประกอบการสอนวิชา Radiation Biology ของโปรเฟสเซอร์ Peter Siegel ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียสเตท โพลีเทคนิค พบว่าไอโซโทปรังสีสลายตัวให้รังสีแกมมา และมีพลังงานมากกว่า 2 MeV มี 3 ไอโซโทปคือ แทลเลียม-208 โซเดียม-24 และไนโตรเจน-16

และจาก library ของโปรแกรม MAESTRO เวอร์ชัน 7.01 ของบริษัท ORTEC ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้อย่างแพร่หลายในงานด้าน Gamma และ Alpha spectroscopy พบว่าไอโซโทปรังสีที่สลายตัวให้รังสีแกมมา ที่มีพลังงานมากกว่า 2 MeV และมีเปอร์เซ็นต์ของรังสีแกมมาจากการสลายตัวมากแบบมีนัยสำคัญ มีทั้งสิ้น 4 ไอโซโทป คือ โซเดียม-24 โคบอลต์-56 คริปทอน-88 และคลอรีน-38

ด้วยเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงเลือกช่วงพลังงานของรังสีแกมมาที่สามารถระบุชนิดไอโซโทปรังสีได้ ไม่เกิน 2 MeV อีกทั้งเพื่อให้การแสดงผลสเปกตรัมบนหน้าจอของอุปกรณ์มีความชัดเจน และเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุชนิดไอโซโทปรังสี

3.2.2 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้า

แหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นส่วนสำคัญของอุปกรณ์แบบเคลื่อนที่ จากแผนภาพรูปที่ 3.1 อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้น ถูกออกแบบให้มีส่วนประกอบในการทำงานที่ใช้ขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแตกต่างกันดังนี้

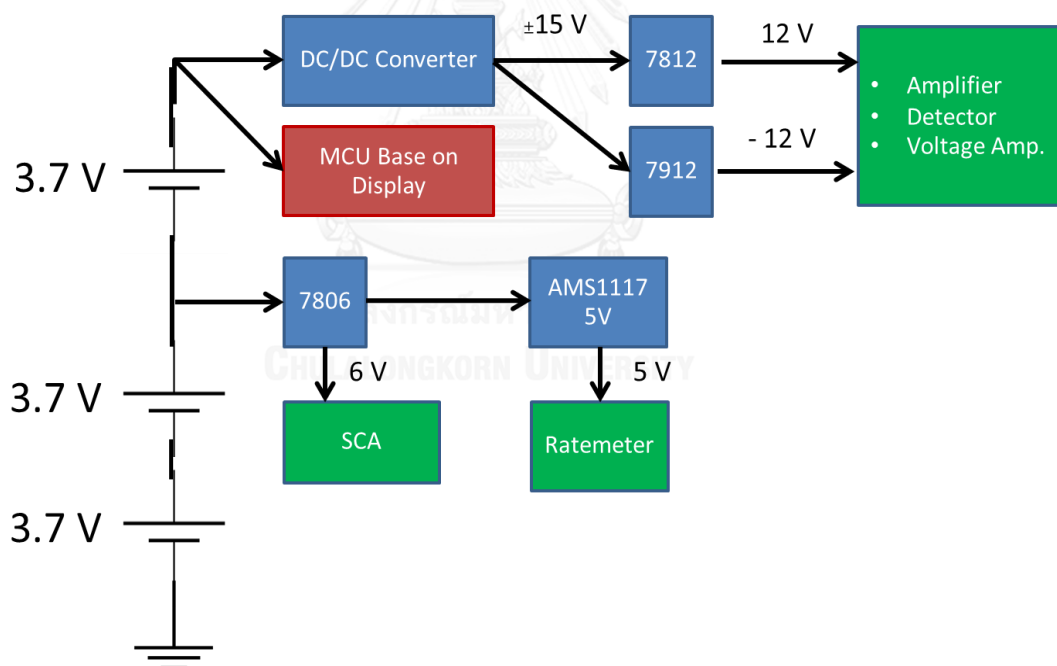
1. หัววัดรังสี CsI (TL) วงจรขยายส่วนหน้า และ วงจรขยายสัญญาณพัลส์ ใช้แรงดันไฟฟ้า ± 12 โวลต์
2. วงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดียว ใช้แรงดันไฟฟ้า 6 โวลต์
3. วงจรเรตมิเตอร์ ใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์

4. ไมโครคอนโทรลเลอร์ ใช้แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนชนิดชาร์จซ้ำได้ ขนาด 3.7 โวลต์ ต่ออนุกรม 3 เซลล์ เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเมื่อชาร์จเต็มจะมีแรงดันไฟฟ้าก่อนละ 4.2 โวลต์ จึงมีแรงดันไฟฟ้ารวม 12.6 โวลต์ แบ่งจ่ายให้ส่วนประกอบต่าง ๆ คือ

แบตเตอรี่ต่ออนุกรม 2 เซลล์แรกซึ่งมีแรงดันไฟฟ้ารวม 8.4 โวลต์ ต่อกับไอซีควบคุมแรงดันไฟฟ้า (Voltage Regulator) เบอร์ 7806 เพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าเหลือ 6 โวลต์ จ่ายให้กับวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยว และต่อเข้ากับไอซี AMS1117 เพื่อปรับระดับแรงดันเหลือ 5 โวลต์ จ่ายให้กับวงจรเรตมิเตอร์

แบตเตอรี่ต่ออนุกรม 3 เซลล์ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้ารวม 12.6 โวลต์ จ่ายให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ChipKIT UNO32 ซึ่งไฟเลี้ยงของไมโครคอนโทรลเลอร์จะจ่ายไฟให้กับหน้าจอแสดงผลต่อไป อีกส่วนหนึ่งจะผ่านวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC/DC converter) ได้แรงดันไฟฟ้า ± 15 โวลต์ ส่งผ่านไอซีเบอร์ 7812 และ 7912 ได้แรงดันไฟฟ้า ± 12 โวลต์ จ่ายให้กับหัววัดรังสี Csi (Tl) วงจรขยายแรงดันไฟฟ้า และ วงจรขยายสัญญาณพัลส์ ดังแสดงในแผนภาพการทำงานรูปที่ 3.3

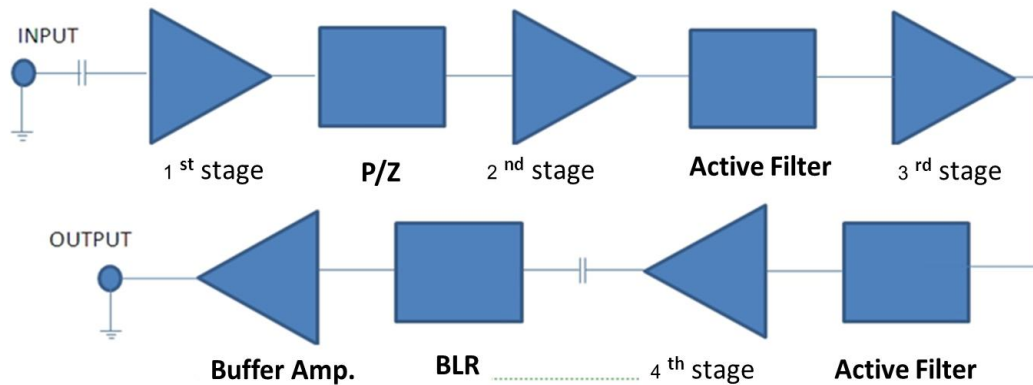


รูปที่ 3.3 แผนภาพการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าวงจรต่าง ๆ จากแบตเตอรี่

3.2.3 วงจรขยายสัญญาณพัลส์ (Pulse Amplifier)

เนื่องจากขนาดความสูงของสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นจากหัววัดรังสีจะต้องปรับเทียบให้สอดคล้องกับระดับพลังงานของไอโซโทปรังสีแต่ละชนิดในกระบวนการวิเคราะห์ความสูงสัญญาณ

พัลส์ (Pulse height analysis) จึงได้ออกแบบวงจรขยายสัญญาณพัลส์ที่ประกอบวงจรขยายส่วนแรก (First stage amplifier) และวงจรขยายสัญญาณหลัก (Main amplifier) วงจรขยายสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่พัฒนาขึ้น ได้นำเทคโนโลยี SMD (Surface Mount Device) เข้ามาใช้งานเพื่อลดขนาดของแผ่นพิมพ์วงจร (Printed circuit board: PCB) สะดวกต่อการซ่อมบำรุงเพราะสามารถหาอะไหล่ในประเทศทดแทนได้ โดยมีโครงสร้างการทำงานแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพการทำงานของวงจรขยายสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่พัฒนาขึ้น

วงจรขยายสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์พัฒนาขึ้นแสดงในรูปที่ 3.5 ออกแบบให้ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด ± 12 โวลต์ มีจุดตรวจสอบสัญญาณในแต่ละส่วนของวงจร (TP1-TP6) แผ่นพิมพ์วงจรมีขนาดกว้าง 6.5 ซม. ยาว 4.5 ซม. แสดงในรูปที่ 3.6 มีส่วนประกอบและการทำงานในแต่ละส่วนของวงจรดังนี้

1. ส่วนวงจรขยายสัญญาณส่วนแรก

เป็นวงจรขยายสัญญาณที่ออกแบบให้มีค่าของอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input impedance) ของวงจรแมตช์ (Matched) กับค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ (Output impedance) ของวงจรส่วนหน้าของหัววัดรังสีและการปรับรูปสัญญาณเบื้องต้นเพื่อช่วยให้ได้อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise ratio) สูงด้วยไอซีขยายสัญญาณ (Operational Amplifier: OP-AMP) ที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ (low noise) เบอร์ TLE2071 (U1) โดยมี R1 และ C2 เป็นตัวกำหนดอัตราการขยายและค่าคงเวลาของสัญญาณเอาต์พุต ส่วน P1 ใช้สำหรับปรับแก้ค่าแรงดันออฟเซตที่เอาต์พุตของออปแอมป์

2. ส่วนวงจรปรับแต่งรูปสัญญาณพัลส์ (Pulse shaping circuit)

เนื่องสัญญาณพัลส์จากเอาต์พุตของวงจรขยายส่วนหน้ามีลักษณะเป็นสัญญาณที่มีการสลาย

แบบเอ็กโพเนนเชียลมีค่าไรส์ไทม์ (Rise time) ที่สั้นมากประมาณ 5-100 นาโนวินาที และมีค่าเวลาการสลายของสัญญาณ (Decay time) ที่ยาวประมาณ 20-500 ไมโครวินาที ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการตรวจวัดขนาดความสูงสัญญาณพัลส์ จึงจำเป็นต้องลดค่าเวลาการสลายของสัญญาณด้วยวงจรอาร์ซีดีฟเฟอร์เรนซีเอเตอร์ (RC Differentiator) พร้อมทั้งวงจรชดเชยค่าโพล-ซีโร (pole-zero compensating circuit) เพื่อปรับแก้ค่าโอเวอร์ชูท (Overshoot) และอันเดอร์ชูท (Undershoot) ของสัญญาณที่เกิดขึ้นจากผลการทำงานของวงจรอาร์ซีดีฟเฟอร์เรนซีเอเตอร์และจากสัญญาณพัลส์ความถี่สูง ซึ่งวงจรในส่วนนี้เป็นการทำงานร่วมกันของ P2 C3 R4 และ R5 ทำให้ได้สัญญาณที่มีค่าเวลาการสลายของสัญญาณที่สั้นลงเหลือประมาณ 3 ไมโครวินาที ในการปรับแต่งรูปสัญญาณพัลส์เพื่อให้ได้สัญญาณพัลส์เอ้าท์พุทที่แบบกึ่งเกาส์เซียน (Semi-Gaussian) และมีขนาดความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่แคบลงเหมาะสมกับการตรวจวัดขนาดความสูงของสัญญาณพัลส์ ในการออกแบบนี้จึงเลือกการแต่งรูปสัญญาณพัลส์แบบ CR-(RC)⁴ ที่มีค่าคงตัวของเวลา (τ) เป็น 1 ไมโครวินาที โดยที่โครงสร้างของวงจร CR เกิดจากวงจรดีฟเฟอร์เรนซีเอเตอร์ในส่วนของโพล-ซีโร คือค่าของ C3 และ R5 ส่วนโครงสร้างของวงจร RC⁴ เกิดขึ้นจากหลายส่วนของวงจรประกอบเข้าด้วยกันคือ R8 กับ C5, R11 กับ C6, R12 กับ C7 และ R21 กับ C10 ตามลำดับ

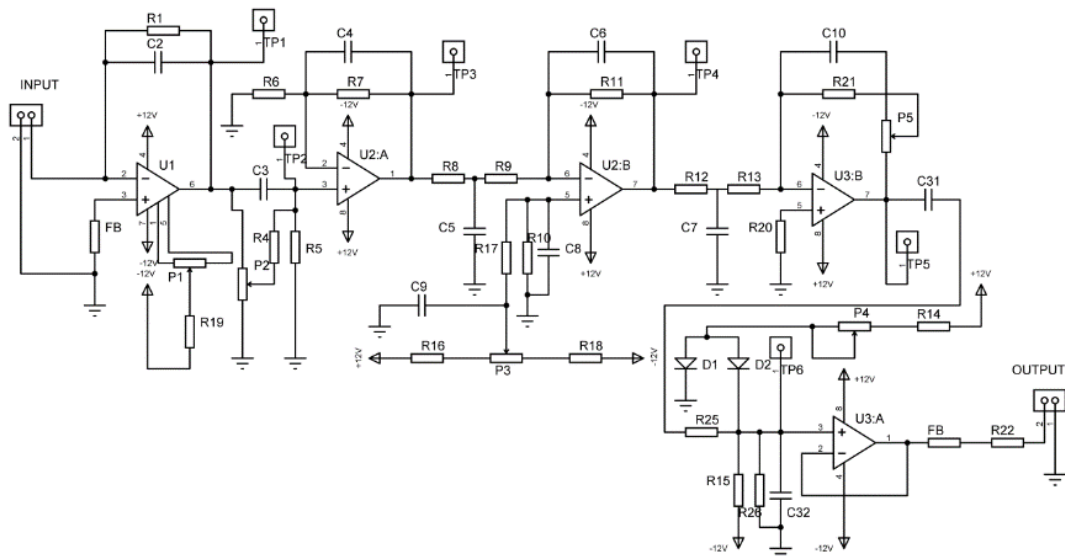
3. ส่วนขยายสัญญาณ

สัญญาณจะถูกขยายให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นด้วยวงจรขยายสัญญาณพัลส์ที่ประกอบด้วยไอซี U2 และ U3 ซึ่งเป็นไอซีขยายสัญญาณที่มีสัญญาณกวนต่ำเบอร์ TLE2072 ที่ภายในไอซี 1 ตัวมี OP-AMP บรรจุอยู่ 2 ตัว (Dual OP-AMP) โดย U2:A เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-Inverting Amplifier) มีอัตราขยาย 2 เท่า ส่วนวงจรขยาย U2:B จัดวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) ที่มีอัตราขยายเป็น 10 เท่า และสัญญาณจะถูกขยายสัญญาณแบบกลับเฟสที่สามารถปรับค่าอัตราขยายได้ตั้งแต่ 2 ถึง 10 เท่า ด้วยตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ P5 อีกครั้งด้วยไอซี U3:B

4. ส่วนวงจรปรับแก้ฐานสัญญาณกลับสู่ศูนย์ (Baseline Restoration: BLR)

ปัญหาหนึ่งที่เกิดกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์คือ การที่เกิดมีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจาก OP-AMP ที่รู้จักกันในชื่อแรงดันออฟเซต (Voltage offset) ในแต่ละส่วนของวงจรขณะทำงานและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เกิดจากการวัดรังสีที่มีความแรงมาก ๆ จนเกิดการทับซ้อนของสัญญาณ (Pile-up) ซึ่งส่งผลให้เกิดมีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงออกไปที่เอาต์พุทของวงจรขยายสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์และทำให้ระบบการวิเคราะห์ความสูงสัญญาณพัลส์ทำงานผิดพลาด ซึ่งแก้ไข

ได้ด้วยวงจรปรับแก้ฐานสัญญาณกลับสู่ศูนย์ที่ประกอบด้วย C13 D1 D2 R14 R15 และ P4 โดยมี ไอซี U3:A ทำหน้าที่เป็นวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer amp) ซึ่งวงจรจะทำการปรับระดับแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงกลับสู่ศูนย์อย่างอัตโนมัติ ขนาดและรูปสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของอุปกรณ์ ขยายสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่พัฒนาแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรขยายสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่พัฒนาขึ้น



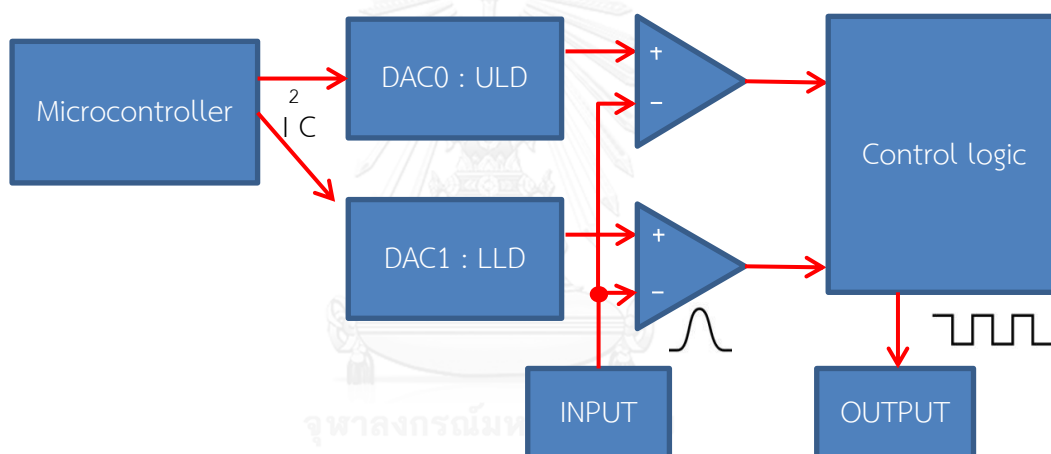
รูปที่ 3.6 แผ่นพิมพ์วงจรขยายสัญญาณ

3.2.4 วงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยว (Single channel analyzer)

วงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยว ทำหน้าที่รับสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ จากวงจรขยายสัญญาณพัลส์ มาวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณและเปลี่ยนรูปสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์เป็นสัญญาณลักษณะ ลอจิกพัลส์ที่มีความกว้าง 500 นาโนวินาที เพื่อเข้าสู่วงจรเรทมิเตอร์ ภายในวงจรวิเคราะห์พลังงาน

แบบช่องเดี่ยวประกอบด้วย วงจรปรับแรงดันอ้างอิง วงจรลอจิก วงจรโมนอสเตเบิล ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 3.7

จากวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยวในรูปที่ 3.8 ไอซีเบอร์ ADR365 ทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (Voltage reference) ที่มีความเสถียรสูง ขนาด 5 โวลต์ต่อเข้ากับขา 2 ของไอซีเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก (DAC) เบอร์ 47FEB12 สามารถโปรแกรมควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าของ LLD และ ULD ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านการเชื่อมต่อชนิด I²C ที่ขา 5 และ 6 เอาต์พุตที่ออกจากไอซี D/A ที่ขา 4 คือ ULD และขา 3 คือ LLD ขนาด 10 บิต ทำให้สร้างช่องวิเคราะห์สัญญาณได้ 1024 ช่อง สัญญาณพัลส์จะถูกเปรียบเทียบกับระดับแรงดันไฟฟ้าของ LLD และ ULD เข้าสู่ NAND Gate ของไอซี 74HC00 (U2) และ Dual JK FLIP FLOP ของไอซี 74107 (U3) และไอซีโมนอสเตเบิล เบอร์ 4538 (U4) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่มีความสูงของสัญญาณอยู่ระหว่าง LLD และ ULD (window) ที่กำหนดเท่านั้น



รูปที่ 3.7 แผนภาพการทำงานของวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยว

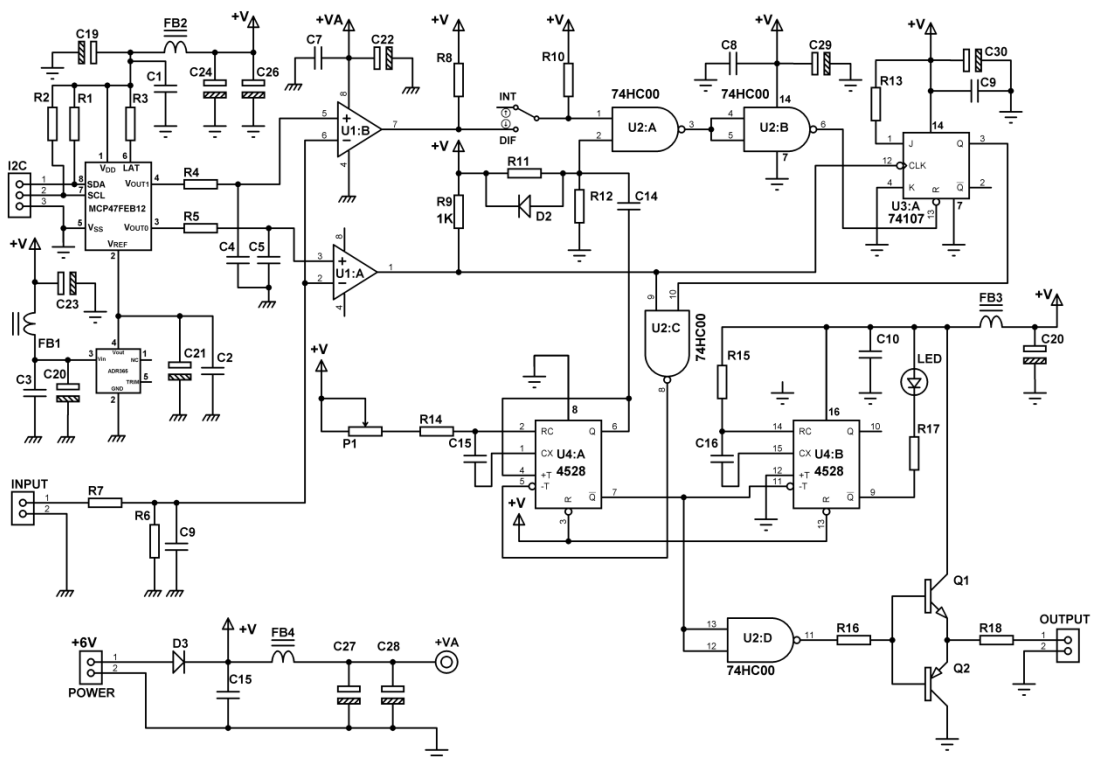
การวิเคราะห์ความสูงของพัลส์เริ่มจากสัญญาณความสูงของพัลส์ (Input Signal) จากวงจรขยายสัญญาณเข้ามาที่อินพุตของไอซี TLE2072 (U1) สัญญาณจะถูกเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ULD ที่ขา 6 ของ U1 และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง LLD ที่ขา 3 ของ U1 สภาวะการวิเคราะห์จะเป็นใน 2 กรณี คือ

กรณีแรกเมื่อ $LLD \leq \text{Input Signal} < ULD$ แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกสัญญาณของ U1 จะเปลี่ยนจากลอจิก "1" เป็น "0" ฟลิปฟลอป U3 จะถูกเซตให้ Q เป็นลอจิก "1" ที่ทำให้สัญญาณทางออกของ U2C เปลี่ยนเป็นลอจิก "0" วงจรโมนอสเตเบิล U4A ถูกกระตุ้นให้ทำงานด้วยขอบขาของ U2C ทำให้ได้สัญญาณพัลส์บวกขนาดความกว้าง 500 นาโนวินาทีที่ทางออกสัญญาณของ U2D

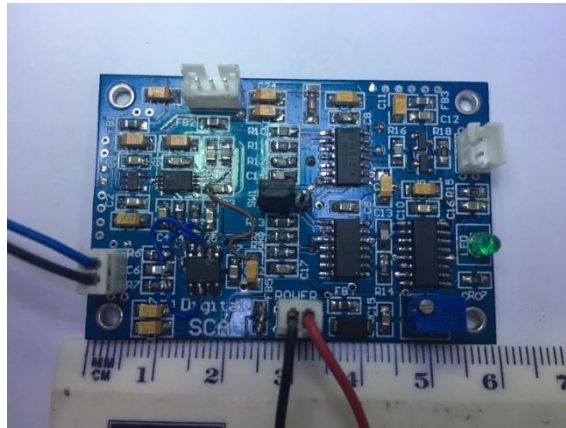
ในขณะที่เดียวกัน U4B ทำงานให้ไดโอดเปล่งแสงติดสว่างขึ้นหลังจากนั้นโมโนสเตเบิล U4A จะกลับสู่สถานะเดิม ขา Q ของ U4A เปลี่ยนจาก "1" เป็น "0" ทำให้ฟลิปฟล็อป U3 จะถูกรีเซท

กรณีที่สองเมื่อ $LLD < \text{Input Signal} > ULD$ ในช่วงเวลาที่ $\text{Input Signal} > LLD$ ทางออกสัญญาณของ U1A จะเป็นลอจิก "0" ฟลิปฟล็อป U3 จะถูกเซตให้ Q เป็นลอจิก "1" และในช่วงที่ $\text{Input Signal} > UL D$ ทางออกสัญญาณของ U1B เป็นลอจิก "0" ฟลิปฟล็อป ถูกรีเซทให้ Q เป็นลอจิก "0" ก่อนที่สัญญาณทางออกของ U1A เปลี่ยนจากลอจิก "0" เป็น "1" ในช่วงเวลาที่สัญญาณอินพุต $\leq LLD$ ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ทางออกสัญญาณของ U2D จึงไม่มีการกระตุ้นให้โมโนสเตเบิล และ U2B ทำงาน ดังนั้นที่ทางออกสัญญาณของ U2D จะไม่ปรากฏสัญญาณพัลส์ออกไป

จากการทำงานที่กล่าวมาข้างต้นทั้งสองกรณี สรุปได้ว่าการทำงานของวงจรวิเคราะห์ความสูงของพัลส์จะให้สัญญาณพัลส์ออกมาได้ก็ต่อเมื่อสัญญาณพัลส์จากวงจรขยายมีความสูงมากกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง LLD แต่น้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง UL D และในสถานะนอกเหนือไปจากนี้จะไม่มีการสัญญาณพัลส์ลอจิกได้ออกมา นอกจากนี้ยังได้ออกแบบให้แผ่นพิมพ์วงจรให้มีการแยกกราวด์ระหว่างสัญญาณอนาล็อกกับสัญญาณดิจิทัล ออกจากกันเพื่อช่วยลดสัญญาณรบกวน และยังใช้เทคโนโลยี SMD เพื่อลดขนาดของแผ่นพิมพ์วงจรเช่นเดียวกับวงจรขยายสัญญาณ แผ่นพิมพ์วงจรวิเคราะห์พัลส์งานแบบช่องเดี่ยวที่พัฒนาขึ้นมีขนาด กว้าง 6 ซม. ยาว 4 ซม. แสดงในรูปที่ 3.9



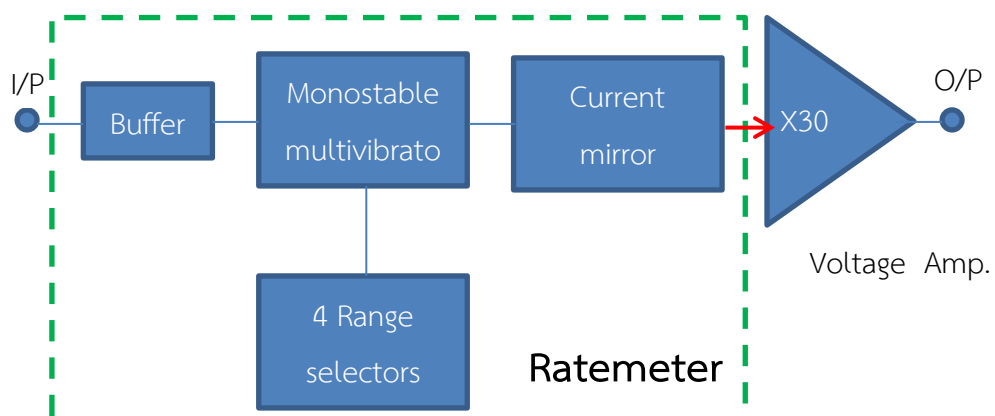
รูปที่ 3.8 วงจรวิเคราะห์พัลส์งานแบบช่องเดี่ยวที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 3.9 แผ่นพิมพ์วงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดียวที่พัฒนาขึ้น

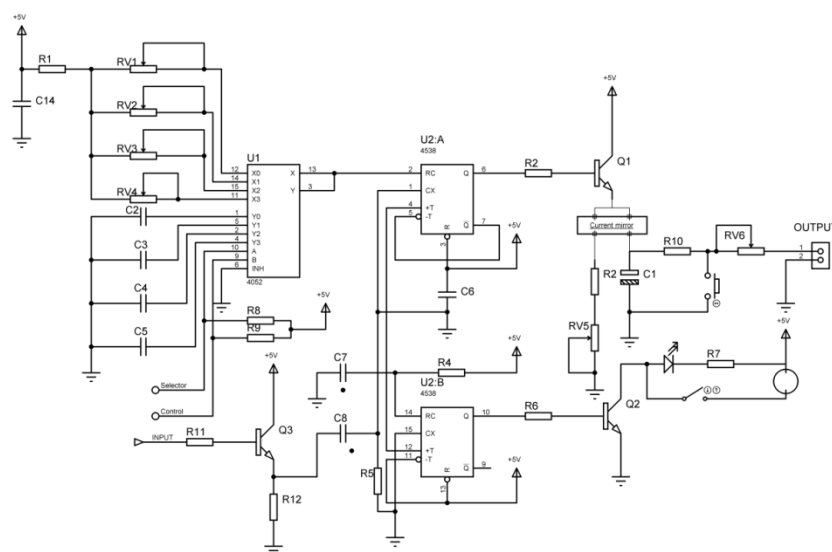
3.2.5 วงจรเรตมิเตอร์และวงจรขยายแรงดันไฟฟ้า

วงจรเรตมิเตอร์หรือวงจรนับอัตรารังสีเฉลี่ย ทำหน้าที่เปลี่ยนอัตรานับรังสีในหน่วยจำนวนนับต่อวินาที (Count per second, cps) เป็นแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่แปรผันตรงกับอัตรานับรังสี เพื่อนำแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไปใช้งานในส่วนการแสดงผลสเปกตรัม การทำงานของวงจรเรตมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยวงจรหลัก คือ 1) วงจรมัลติเพล็กซ์ (Multiplexers) หรือวงจรเลือกข้อมูล (Data selector) เพื่อเลือกสัญญาณอินพุตจากหลายอินพุตที่ถูกป้อนเข้ามาให้ออกไปที่เอาต์พุตเพียงสัญญาณเดียว 2) วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Monostable multivibrator) สำหรับสร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นมา และต่อเข้ากับวงจรขยายแรงดัน (Voltage Amplifier) เพื่อให้มีแรงดันสูงสุดมีค่าประมาณ 3.3 โวลต์ โดยมีแผนภาพการทำงานในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนภาพการทำงานของวงจรเรตมิเตอร์ร่วมกับวงจรขยายแรงดันไฟฟ้า

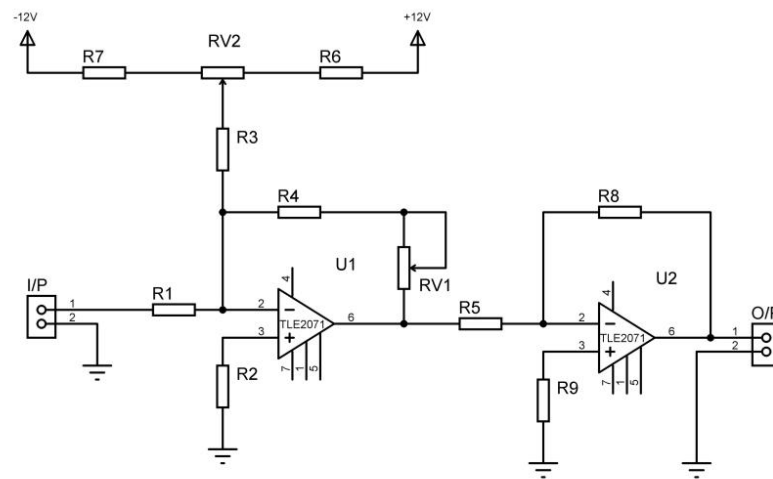
การทำงานของวงจรเรตมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นทำงานโดย เมื่อได้รับสัญญาณจากวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดียว สัญญาณจะผ่านทรานซิสเตอร์ Q3 ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรมัลติเพล็กซ์ เมื่อสัญญาณผ่าน R5 และ C8 จะสร้างสัญญาณทริกที่ขอบขาขึ้นของสัญญาณพัลส์ เข้าสู่ไอซีโมโนสเตเบิล เบอร์ 4538 เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์หลังจากมีการทริกให้วงจรเกิดสัญญาณ ซึ่งระยะเวลาที่สัญญาณเอาต์พุตของโมโนสเตเบิลเปลี่ยนแปลงนั้นเกิดจากการกำหนดค่าคงตัวเวลา โดยการใช้ตัวต้านทาน R4 กำหนดค่าของกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C7 ในการใช้ระยะเวลาการเก็บประจุเลือกความถี่ด้วย Selector switch ที่ต่อเข้ากับไอซีมัลติเพลกเซอร์ เบอร์ 4052 โดยใช้ตัวต้านทานแปรค่าได้ P1-P4 และตัวเก็บประจุ C1-C4 เพื่อกำหนดช่วงความถี่ทั้ง 4 ช่วง ที่เอาต์พุตของโมโนสเตเบิลจะต่อเข้ากับวงจรสะท้อนกระแส (Current mirror) ซึ่งจะจ่ายกระแสไฟฟ้าตามสัญญาณของโมโนสเตเบิลให้กับตัวเก็บประจุ C6 เมื่อมีความกว้างของสัญญาณพัลส์มากก็จะยิ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าได้มาก การจ่ายกระแสให้มากขึ้นจะทำให้มีแรงดันไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุแตกต่างกันไปด้วย วงจรเรตมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถควบคุมการเลือกช่วงความถี่ได้ 4 ช่วงคือ 0-100 0-1000 0-10000 และ 0-100000 เฮิรตซ์ ซึ่งในการประกอบเข้าเป็นอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปแบบพกพานั้นจะต้องใช้งานกับแบตเตอรี่ โดยใช้แบตเตอรี่มีขนาด 3.7 โวลต์ จึงจำเป็นต้องมีวงจรรักษาแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ ไอซี AMS1117 ปรับแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาด 5 โวลต์เพื่อนำมาจ่ายให้กับวงจรเรตมิเตอร์ วงจรเรตมิเตอร์แสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรเรตมิเตอร์

เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่เอาต์พุตของเรตมิเตอร์ในทุกย่านการวัดมีค่า 100 มิลลิโวลต์จึงจำเป็นต้องต่อเข้ากับวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในทุกช่วงความถี่ให้มีขนาดสูงสุดประมาณ 3.3 โวลต์เพื่อการใช้งานในส่วนควบคุมการแสดงผล

วงจรรขยายแรงดันไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นได้ใช้ไอซีเบอร์ TLE2071 ต่อแบบวงจรรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) ทั้ง 2 ช่วง ช่วงแรกอัตราขยายขึ้นกับ R1 และ R4 และสามารถปรับอัตราขยายโดยใช้ RV1 ปรับแรงดันออฟเซตโดยใช้ RV2 และช่วงหลังเป็นวงจรรพัพเพอร์ วงจรรขยายแรงดันไฟฟ้านี้ใช้แรงดัน ± 12 โวลต์ ในการไบแอส ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรรขยายแรงดันไฟฟ้า

3.2.6 ส่วนแสดงผลและโปรแกรม

เนื่องจาก DAC มีขนาด 10 บิต หรือ 1024 ช่อง และความสูงของสัญญาณพัลส์สูงสุดเป็น 5 โวลต์ ดังนั้น 1 ช่องจึงมีขนาด 4.8875 มิลลิโวลต์ สามารถแบ่งสแตปการสแกนได้เพื่อเลือกขนาดของช่องวิเคราะห์พลังงาน (window) เช่น หากเลือกสแตปเป็น 10 ขนาดของ window จะเท่ากับ $10 \times 4.8875 = 48.875$ มิลลิโวลต์ ดังนั้นจะมีค่าที่วัดได้ทั้งหมด $5000/48.875 = 102$ ค่า เป็นต้น ดังนั้นหากกำหนดค่าสแตปการสแกนมากขึ้นขนาดของ window ความละเอียดในการวัดจะลดลงและจำนวนค่าแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลจะลดลง

โปรแกรมสแกนของวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยวควบคุมไอซีแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาล็อกด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เชื่อมต่อผ่าน I²C Bus ใช้สายสัญญาณ 2 เส้น คือ serial data (SDA) ต่อเข้ากับพอร์ต AN4 และสาย serial clock (SCL) ต่อเข้ากับพอร์ต AN5 โดย

เขียนโปรแกรมกำหนดสถานะเริ่มต้น (Start Condition) เพื่อแสดงการขอใช้บัส รหัสควบคุม (Control byte) แล้วให้รับค่า LLD, ULD, Window (ΔE), และ เวลาในการสแกนจาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 10 บิต ไปเป็นแรงดันไฟฟ้าขนาด 0-5 โวลต์ เพื่อใช้เป็นแรงดัน เปรียบเทียบกับสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์

ระบบแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ทำหน้าที่เป็นส่วนประมวลผลการวัด รังสี โดยแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรเรติเมตรและผ่านการขยายแรงดันไฟฟ้าได้ 3.3 โวลต์ เป็น สัญญาณดิจิทัล เพื่อแสดงข้อมูลความถี่ของการเกิดสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่ระดับพลังงานของรังสี แกมมาจากสารกัมมันตรังสี โดยต่อเอาต์พุตจากวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าเข้ากับพอร์ต AN0 ของ ไมโครคอนโทรลเลอร์

อุปกรณ์ระบบชุดไอโซโทปที่พัฒนาขึ้นมีสวิตช์ทั้งหมด 6 ปุ่ม ต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้แก่

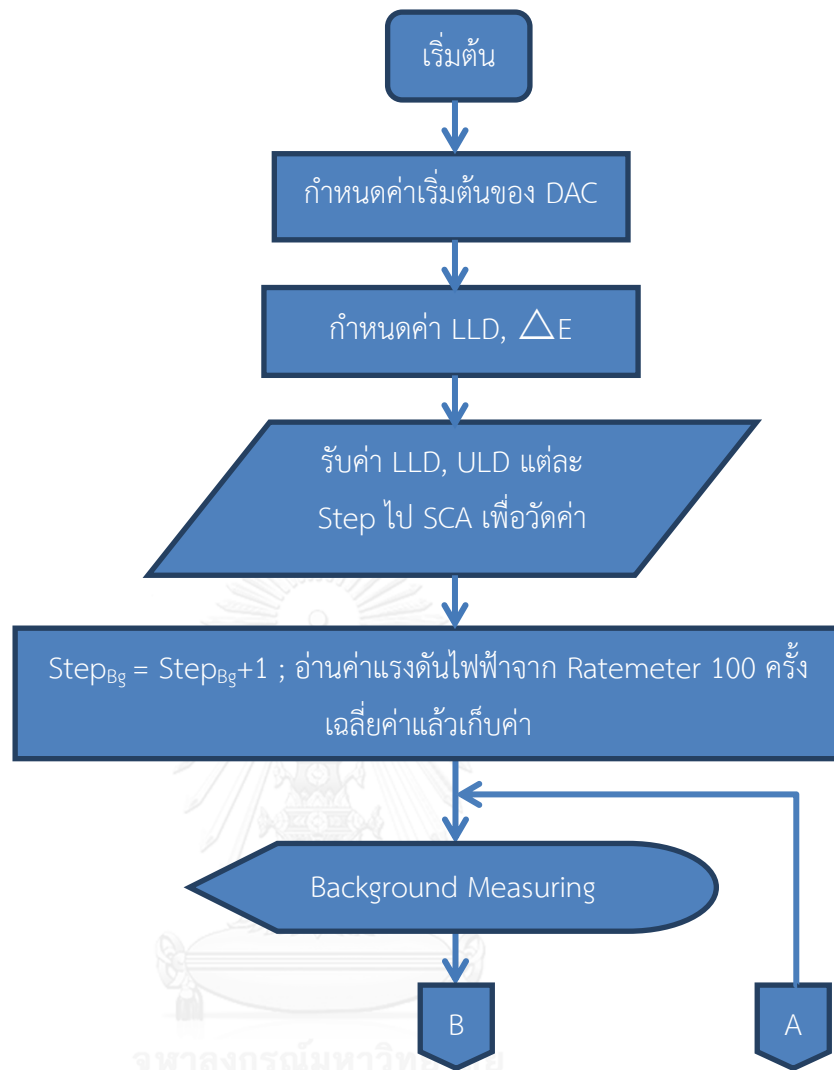
1. สำหรับเปิด-ปิดเครื่องเพื่อควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ซึ่งได้อธิบายใน หัวข้อ 3.2.2

2. ด้านล่างของจอแสดงผลจะมี Tact Switch 4 ปุ่ม ประกอบด้วย

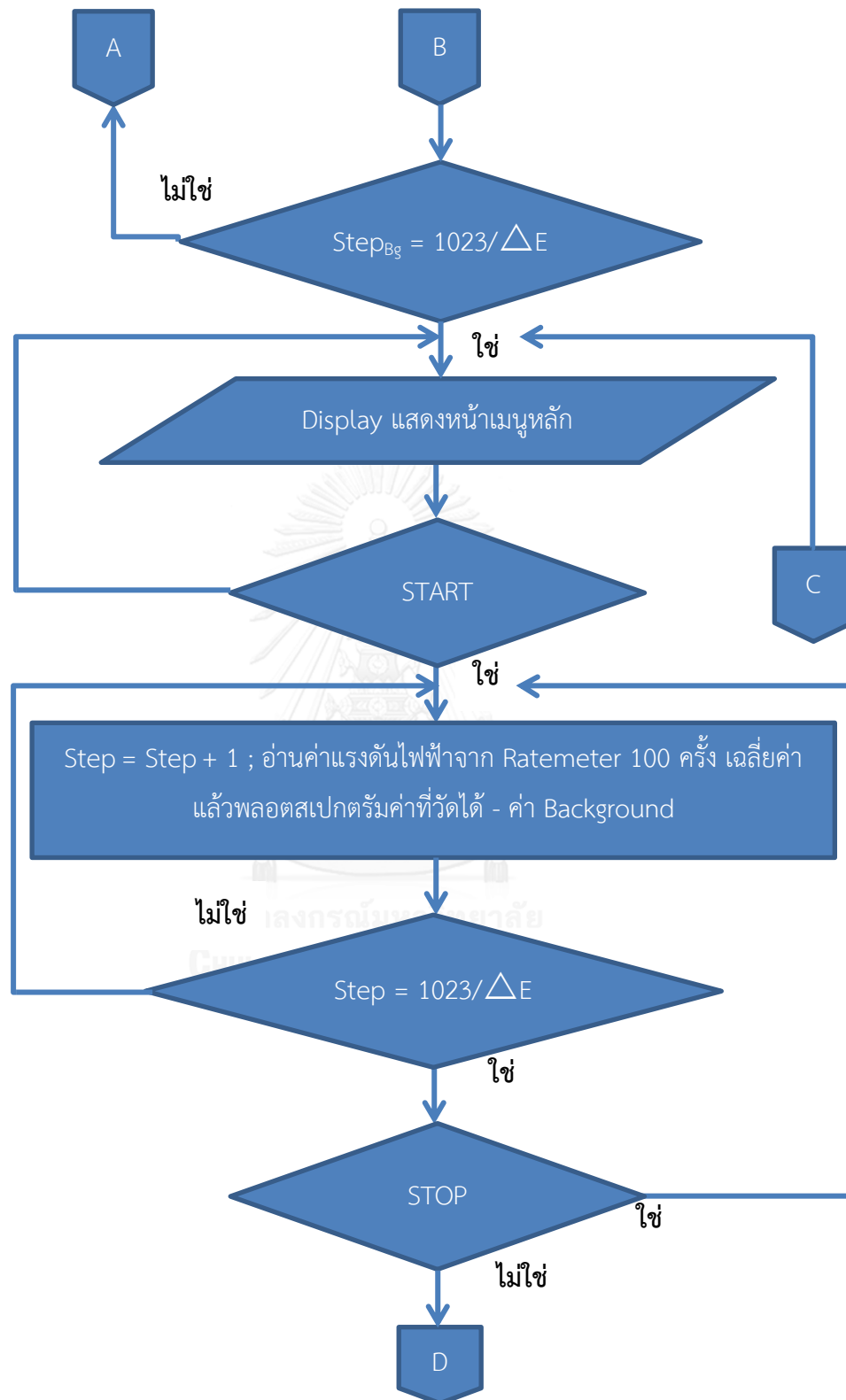
1. ปุ่ม START สำหรับเริ่มต้นการสแกน ต่อเข้ากับพอร์ต AN10
2. ปุ่ม EXIT สำหรับออกจากการใช้งานไปหน้าหลัก ต่อเข้ากับพอร์ต D2
3. ปุ่ม LEFT สำหรับเลื่อนตัวชี้ตำแหน่งไปทางซ้าย ต่อเข้ากับพอร์ต D8
4. ปุ่ม RIGHT สำหรับเลื่อนตัวชี้ตำแหน่งไปทางขวา ต่อเข้ากับพอร์ต D35

3. ด้านข้างของจอแสดงผลจะมี Tact Switch 1 ปุ่มคือ ปุ่ม STOP สำหรับหยุดการสแกน ต่อเข้ากับพอร์ต D7

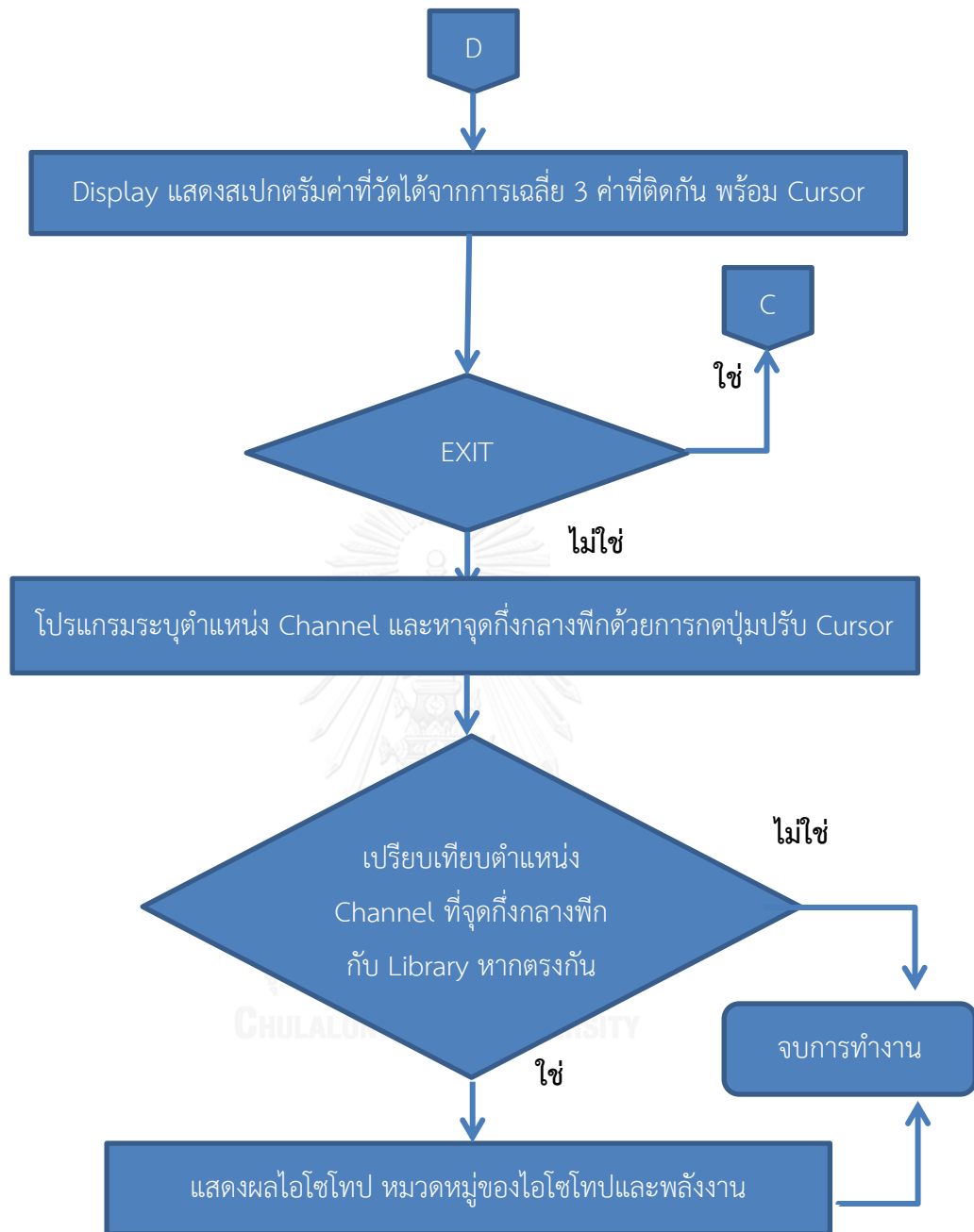
ขั้นตอนการทำงานโดยรวมคือ หลังจากที่กำหนดค่าสถานะเริ่มต้นของ DAC แล้ว จึง กำหนดค่า LLD, ΔE , จำนวนสเตปของการสแกน และจำนวนรอบของการสแกน แล้วส่งค่าทั้งหมด ไปวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยวเพื่อวัดค่าแบ็คกราวนด์ เฉลี่ยเก็บไว้ จากนั้นเข้าสู่หน้าเมนูหลัก เมื่อกดปุ่ม Start โปรแกรมจะเริ่มทำงานด้วยการสแกนด้วยค่าที่กำหนดไว้ข้างต้นเมื่อแล้วเสร็จจะ แสดงสเปกตรัมพร้อมตัวบ่งชี้ตำแหน่ง ซึ่งเมื่อเลื่อนตัวบ่งชี้ตำแหน่งไปยังจุดกึ่งกลางของโฟโตพีค จะ แสดงไอโซโทปรังสีและพลังงาน ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบพลังงานกับจำนวน Channel ได้สมการ $Y = 21.613X + 56.839$ เมื่อ Y แทนพลังงานของรังสีแกมมาและ X แทน จำนวน Channel แผนผังการทำงานของโปรแกรมในอุปกรณ์ระบบชุดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้นแสดงในรูปที่ 3.13-3.15



รูปที่ 3.13 แผนผังการทำงานของโปรแกรมในอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 3.14 แผนผังการทำงานของโปรแกรมในอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้น (ต่อ)



รูปที่ 3.15 แผนผังการทำงานของโปรแกรมในอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้น (ต่อ)

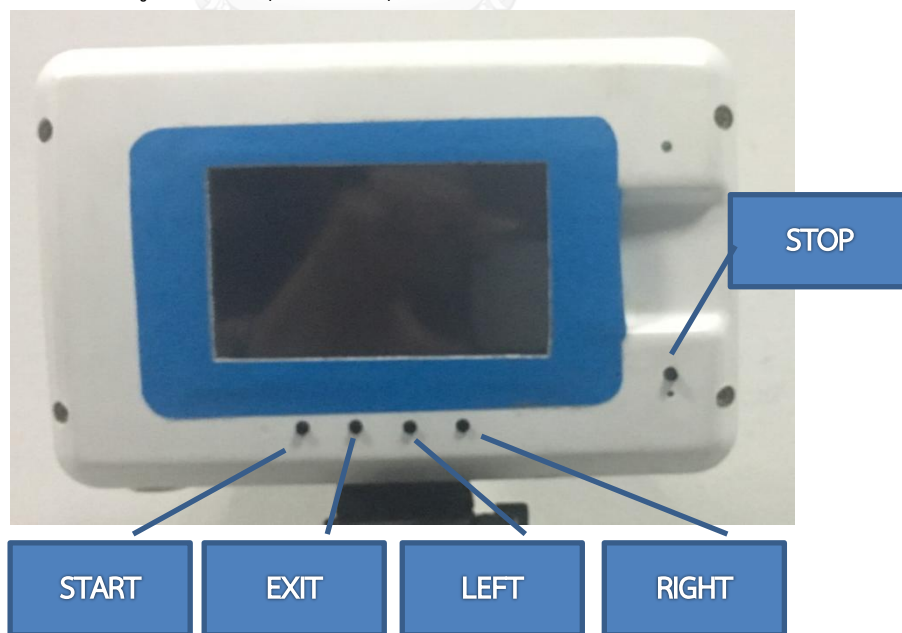
3.2.7 การประกอบอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้น

หลังจากออกแบบและทดสอบการทำงานของส่วนประกอบต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงทำการประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกันเพื่อพร้อมใช้งานจริง อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้นมีขนาดกว้าง 20.5 ซม. ยาว 13 ซม. หนา 6.5 ซม. ลักษณะคล้ายกล่องถายรูป มีขาตั้ง

สำหรับวางอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ด้านหลังมีจอแสดงผลและปุ่มกด ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ภายในอุปกรณ์แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกประกอบไปด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ หน้าจอแสดงผล และแบตเตอรี่ อีกส่วนประกอบไปด้วย หัววัดรังสี วงจรขยายสัญญาณ วงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยว วงจรเรตมิเตอร์และวงจรขยายสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และ 3.19



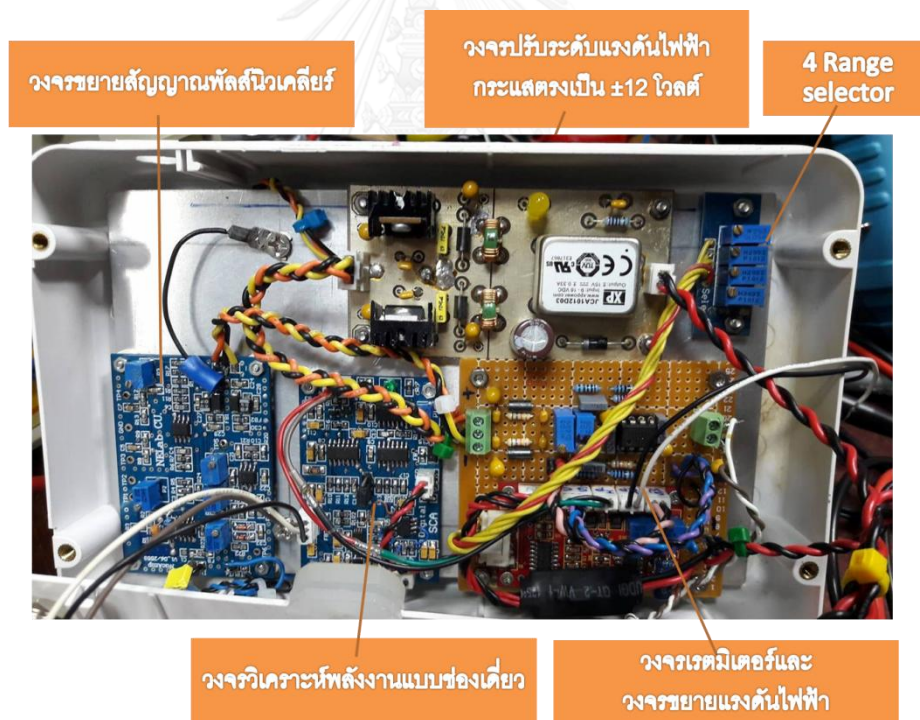
รูปที่ 3.16 อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 3.17 อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปที่พัฒนาขึ้นฝั่งจอแสดงผลพร้อมแสดงปุ่มกด



รูปที่ 3.18 ภายในอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้นฝั่งจอแสดงผล



รูปที่ 3.19 ภายในอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้นฝั่งหัววัดรังสี

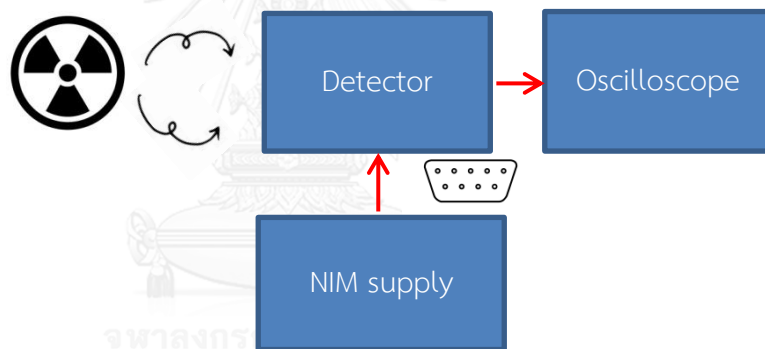
บทที่ 4

การทดสอบสมรรถนะของระบบ

วงจรและส่วนประกอบที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทป ก่อนประกอบได้ทำการทดสอบสมรรถนะการทำงานทุกส่วน และอุปกรณ์หลังประกอบแล้วได้ทำการทดสอบการทำงานโดยรวมทั้งระบบของอุปกรณ์ ดังนี้

4.1 การทดสอบหัววัดรังสี

การทดสอบหัววัดรังสีซีเอ็มไอโอไดต์ประกอบด้วยโฟโตไดโอดชนิดพินพร้อมวงจรขยายส่วนหน้า โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานซีเอ็ม-137 และ โคบอลต์-60 ทำการทดสอบโดยจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.1 สังเกตขนาด รูปร่างของสัญญาณที่เกิดขึ้นจริง เพื่อออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในส่วนถัดไป



รูปที่ 4.1 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบหัววัดรังสี

4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หัววัดรังสีชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI (TI) ประกอบด้วยโฟโตไดโอดชนิดพิน ของบริษัท Hamamatsu รุ่น H3590-08
2. สารรังสีมาตรฐานซีเอ็ม-137 และ โคบอลต์-60
3. เครื่องอ่านรูปสัญญาณแบบพกพา (Handheld Oscilloscope) ของบริษัท Siglent รุ่น SHS810
4. NIM Supply

4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. จัดอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 4.1

2. จ่ายไฟฟ้าจาก NIM ให้กับวงจรขยายสัญญาณส่วนหน้าไปที่หัววัดรังสีหัววัดรังสีชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI (TL)
3. วัดรังสีแกมมาจากสารรังสีมาตรฐานซีเซียม-137 และ โคบอลต์-60 แล้ววัดสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นจากเครื่องอ่านรูปสัญญาณแบบพกพา

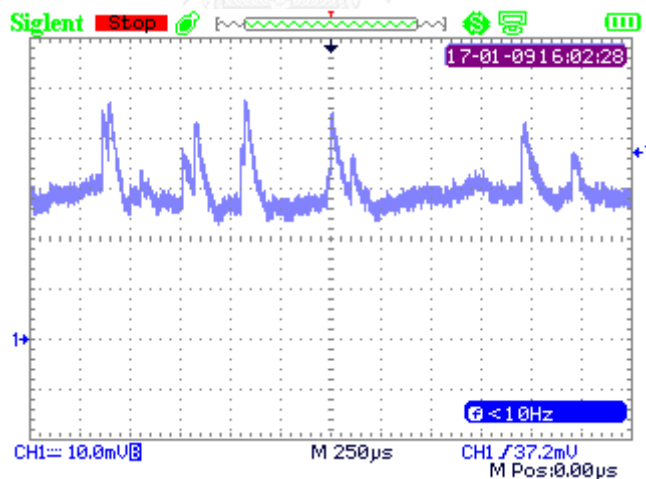
ผลการทดสอบ

สัญญาณพัลส์นิวเคลียร์จากหัววัดรังสีชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI (TL) ประกอบกับโฟโตไดโอดชนิดพินผ่านวงจรขยายส่วนหน้า เมื่อทำการวัดรังสีแกมมาจากสารรังสีมาตรฐานซีเซียม-137 และ โคบอลต์-60 พบว่าสัญญาณมีค่าทางบวก และมี DC offset เกิดขึ้นประมาณ 10 มิลลิโวลต์

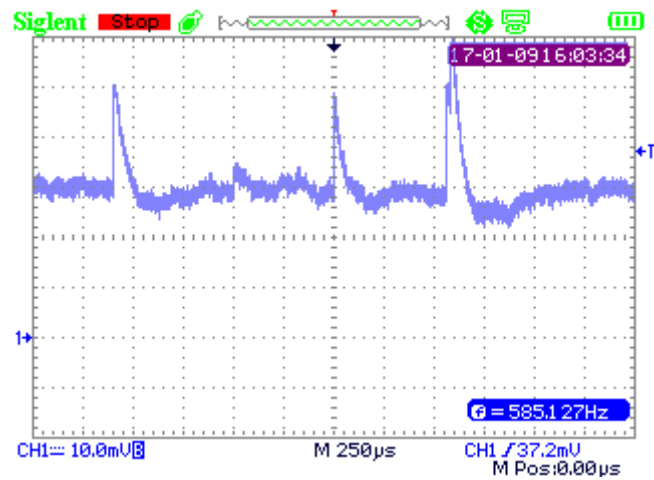
เมื่อทำการวัดรังสีแกมมาจากสารรังสีมาตรฐานซีเซียม-137 สัญญาณพัลส์มีขนาด 10-20 มิลลิโวลต์ มีค่าเวลาการสลายตัวประมาณ 125 ไมโครวินาที

และเมื่อทำการวัดรังสีแกมมาจากสารรังสีมาตรฐานโคบอลต์-60 สัญญาณพัลส์มีขนาด 20-30 มิลลิโวลต์ มีค่าเวลาการสลายตัวประมาณ 125 ไมโครวินาที

รูปสัญญาณที่อ่านได้เมื่อทำการวัดรังสีแกมมาจากสารรังสีมาตรฐานทั้งสอง แสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



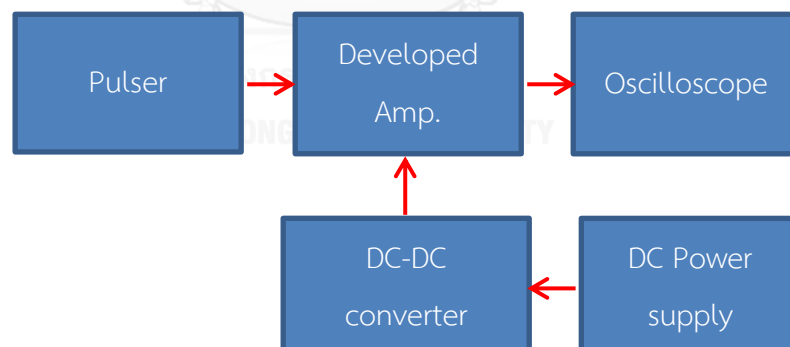
รูปที่ 4.2 สัญญาณพัลส์นิวเคลียร์จากหัววัดรังสีชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI (TL) ประกอบกับโฟโตไดโอดชนิดพินผ่านวงจรขยายส่วนหน้าเมื่อทำการวัดรังสีแกมมาจากสารรังสีมาตรฐานซีเซียม-137



รูปที่ 4.3 สัญญาณพัลส์นิวเคลียร์จากหัววัดรังสีชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI (TI) ประกอบกับโฟโตไดโอดชนิดพินผ่านวงจรขยายส่วนหน้าเมื่อทำการวัดรังสีแกมมาจากสารรังสีมาตรฐานโคบอลต์-60

4.2 การทดสอบวงจรขยายสัญญาณพัลส์

การทดสอบวงจรขยายสัญญาณพัลส์ที่พัฒนาขึ้น มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบรูปสัญญาณเอาต์พุต ค่าคงตัวของเวลาปรับแต่งรูปสัญญาณ (Shaping time) อัตราการขยายของวงจรขยายสัญญาณ ความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตราการขยายแบบอินทิกรัล (Integral Non-linearity) และรูปสัญญาณเมื่อมีสารรังสีมาตรฐาน โดยจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบสมรรถนะของวงจรขยายสัญญาณพัลส์

4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์เลียนแบบหัววัดรังสี (Pulser) ของบริษัท CANBERRA รุ่น 814FP
2. วงจรขยายสัญญาณพัลส์ที่พัฒนาขึ้น

3. เครื่องอ่านรูปสัญญาณแบบพกพา (Handheld Oscilloscope) ของบริษัท Siglent รุ่น SHS810
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ของบริษัท Hewlett Packard รุ่น 6236B
5. สารรังสีมาตรฐานซีเซียม-137 และ โคบอลต์-60
6. หัววัดรังสีชนิดฟลักซ์ซินทิลเลเตอร์ CsI (TI) ประกอบกับโฟโตไดโอดชนิดพิน ของบริษัท Hamamatsu รุ่น H3590-08 และวงจรขยายส่วนหน้า
7. วงจรปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. จัดอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 4.4
2. ใช้หัววัดรังสี CsI (TI) วัดสัญญาณหลังจากผ่านวงจรขยายสัญญาณ ปรับเทียบพลังงานของสารรังสี ซีเซียม-137 ให้ได้ 1.65 โวลต์ แล้วตั้งอัตราขยายคงที่นั้นไว้ พร้อมกับปรับวงจรชดเชยโพลซีโร และ DC Offset ให้รูปสัญญาณพัลส์เป็นแบบเกาส์เซียนหรือใกล้เคียงเกาส์เซียนมากที่สุด
3. ป้อนสัญญาณอินพุตบวก (Positive input) จากเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์เลียนแบบหัววัดรังสีเข้ากับวงจรขยายสัญญาณพัลส์ที่พัฒนาขึ้น เมื่อขนาดของสัญญาณอินพุตเปลี่ยนไปแล้วบันทึกผล ทดสอบที่อัตราขยาย 50 และ 250 เท่า
4. ทดสอบความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตราการขยายแบบอินทิกรัล (Integral Non-linearity) โดยตั้งอัตราขยายคงที่ค่าหนึ่ง เมื่อขนาดของสัญญาณอินพุตเปลี่ยนไป บันทึกขนาดสัญญาณเอาต์พุต พร้อมหาความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตราการขยายแบบอินทิกรัล

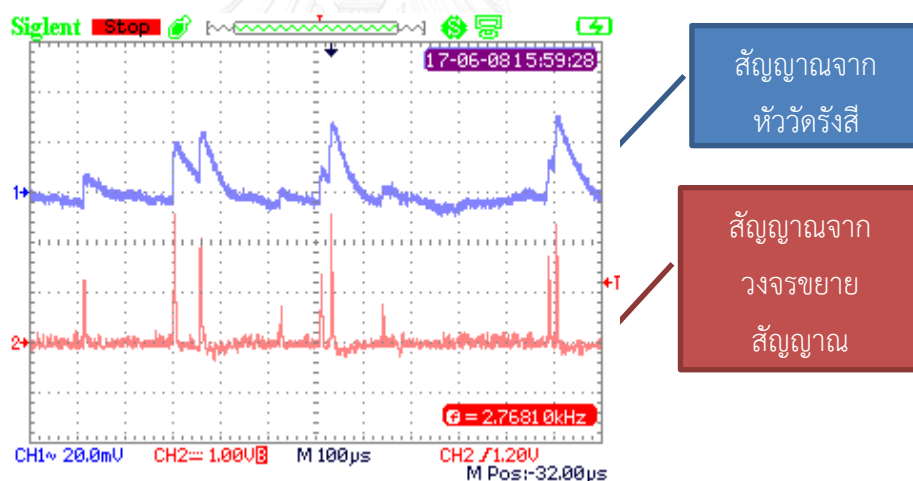
ผลการทดสอบ

ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่พัฒนาขึ้น ในส่วนที่เป็นข้อมูลทางเทคนิคที่สำคัญ ได้แก่ ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต ความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตราการขยายสัญญาณ

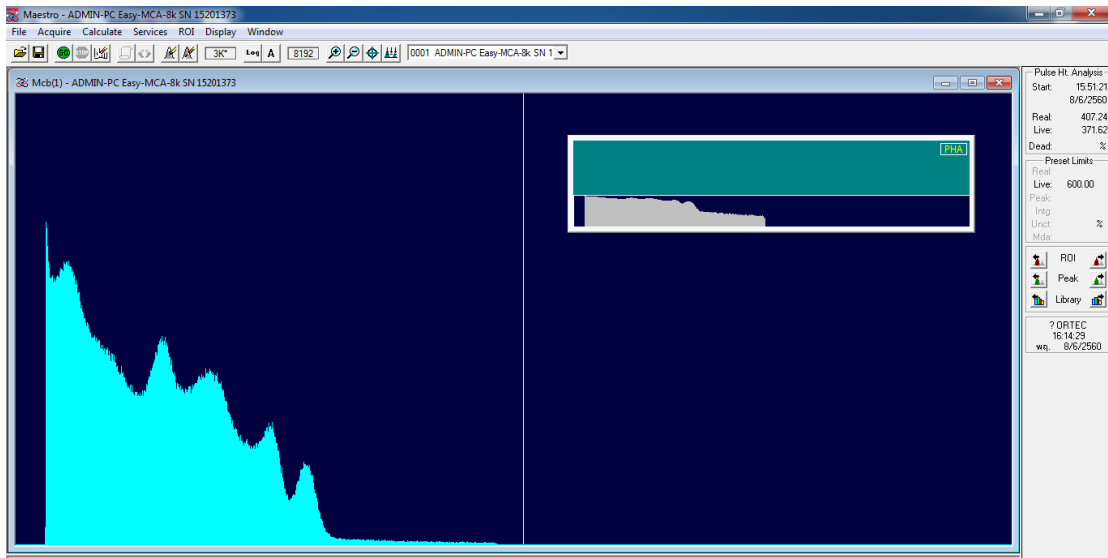
4.2.3 การทดสอบกับสารรังสีมาตรฐาน

อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้นสามารถระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่มีพลังงานไม่เกิน 2 MeV จึงใช้สารรังสีมาตรฐานซีเซียม-137 พลังงาน 0.662 MeV และโคบอลต์-60 พลังงาน 1.17 และ 1.33 MeV

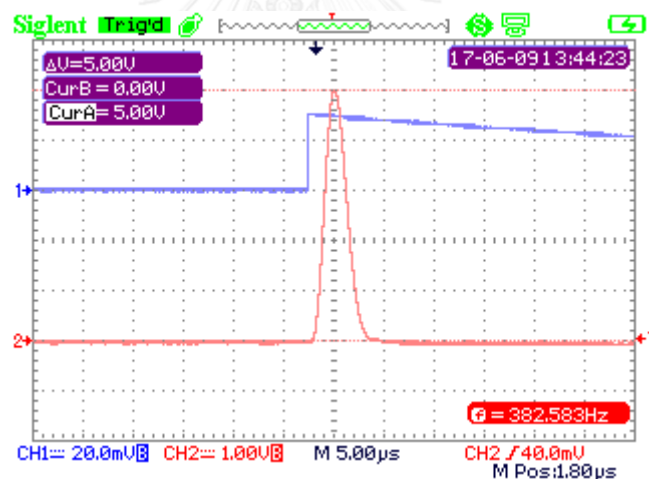
ทำการปรับเทียบขนาดของสัญญาณจากหัววัดรังสีเมื่อผ่านการขยายสัญญาณ พบว่า ความสูงของสัญญาณพัลส์เมื่อวางสารรังสีมาตรฐานทั้ง 2 ชนิดบนหัววัดรังสี มีความแตกต่างกัน สามารถบอกได้ว่าหัววัดรังสีนี้สามารถแจกแจงพลังงานได้ หลังจากปรับอัตราขยายสัญญาณแล้วขนาดความสูงของสัญญาณพัลส์จากซีเซียม-137 อยู่ที่ประมาณ 1.6 โวลต์และสัญญาณจากโคบอลต์-60 อยู่ที่ประมาณ 3 โวลต์ อีกทั้งยังปรับเทียบอัตราขยายกับพลังงานด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง โดยใช้ความสูงของสัญญาณพัลส์จาก pulser 5 โวลต์ เทียบกับไอโซโทปรังสีพลังงาน 2 MeV พบว่าใช้อัตราขยายประมาณ 170 เท่า ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.5-4.7



รูปที่ 4.5 สัญญาณจากวงจรขยายสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่พัฒนาขึ้นเมื่อทดสอบกับสารรังสีมาตรฐานซีเซียม-137 และโคบอลต์-60



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของซีเซียม-137และโคบอลต์-60 จากอุปกรณ์วิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง
หลังจากปรับเทียบอัตราขยายสัญญาณ



รูปที่ 4.7 สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่พัฒนาขึ้นขนาด 5 โวลต์

4.2.4 การทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต

โดยตั้งอัตราขยายที่ 170 ทำการป้อนสัญญาณอินพุตบวก (Positive input) จากเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์เลียนแบบหัววัดรังสี (Pulser) ของบริษัท Canberra รุ่น 814FP ที่สามารถปรับขนาดสัญญาณพัลส์ได้ เข้ากับวงจรขยายสัญญาณพัลส์ที่พัฒนาขึ้น และป้อนแรงดัน ± 12 โวลต์ จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าของบริษัท Hewlett Packard รุ่น 6236B ให้กับวงจรขยายสัญญาณพัลส์ที่พัฒนาขึ้น ทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตด้วยเครื่องอ่านรูปสัญญาณแบบพกพา (Handheld Oscilloscope) ของ

บริษัท Siglent รุ่น SHS810 แสดงดังรูปที่ 4.8-4.10 จะเห็นได้ว่ามีความเชิงเส้นที่ดีมาก ผลการทดสอบการความเสถียรของอัตราขยายที่ 50 170 และ 200 เท่า แสดงในรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ พบว่าอัตราขยายเฉลี่ยที่กำลังขยาย 50 170 และ 200 เท่า มีค่าเป็น 49.27 169.67 และ 200 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจขยายสัญญาณที่อัตราขยาย 50

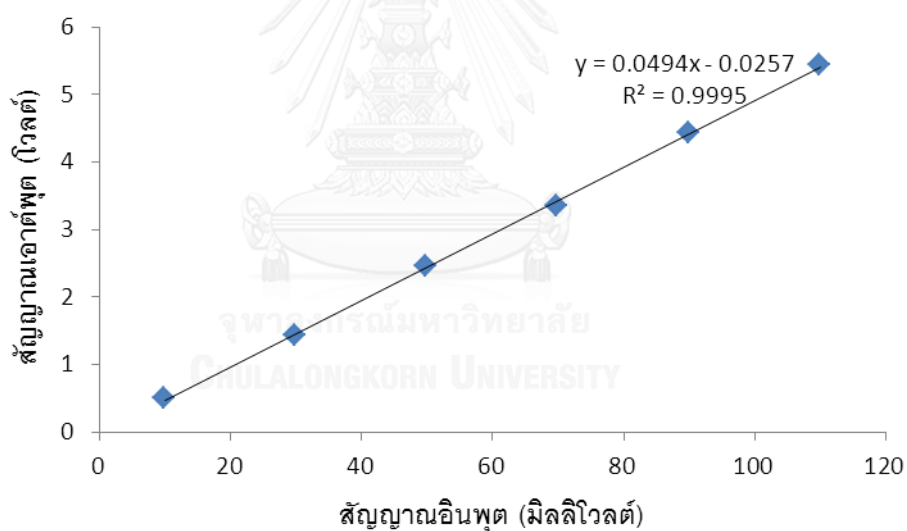
ขนาดสัญญาณอินพุต (มิลลิโวลต์)	ขนาดสัญญาณเอาต์พุต (โวลต์)	อัตราขยาย
10	0.50	50
30	1.44	48
50	2.46	49.2
70	3.36	48
90	4.44	49.33
110	5.44	49.45
อัตราขยายเฉลี่ย		49.27
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.82

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจขยายสัญญาณที่อัตราขยาย 170

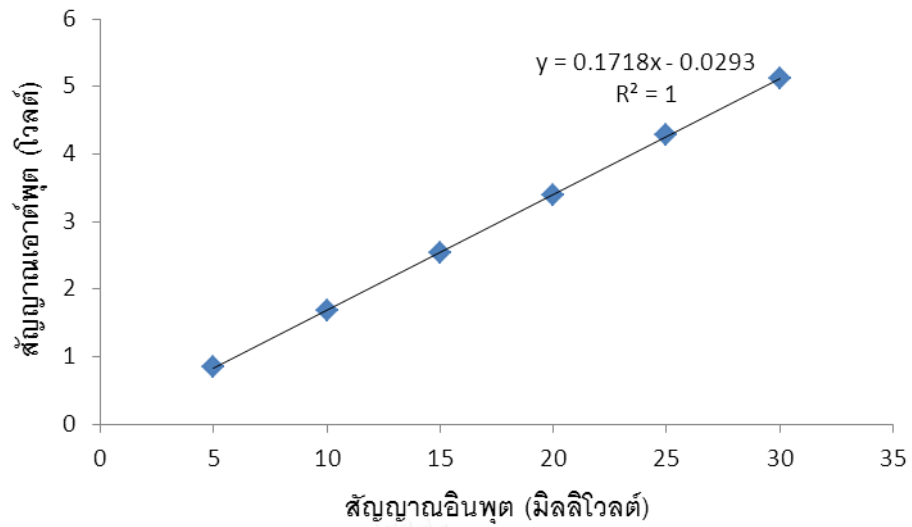
ขนาดสัญญาณอินพุต (มิลลิโวลต์)	ขนาดสัญญาณเอาต์พุต (โวลต์)	อัตราขยาย
5	0.84	168
10	1.68	168
15	2.54	169.33
20	3.40	170
25	4.28	171.2
30	5.12	170.67
อัตราขยายเฉลี่ย		169.67
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		1.34

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรขยายสัญญาณที่อัตราขยาย 200

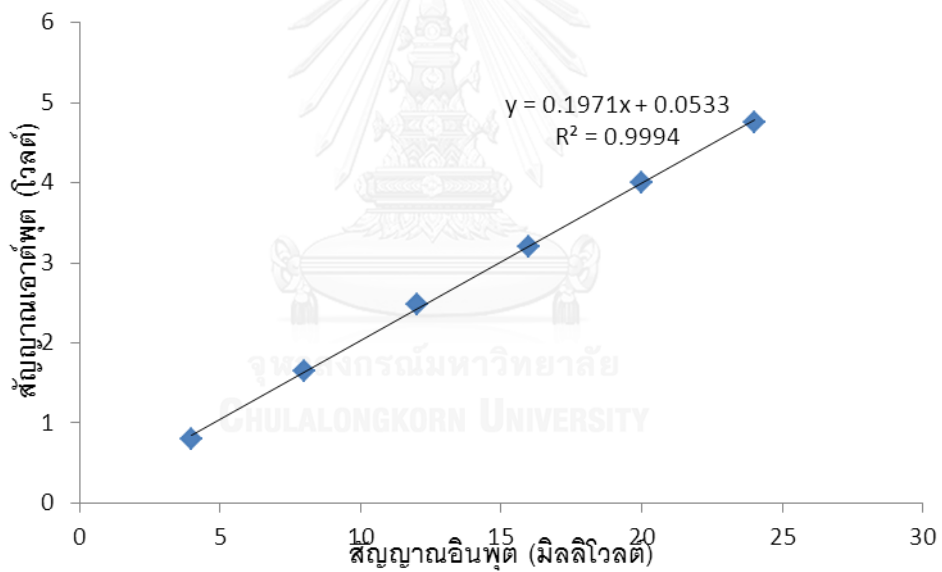
ขนาดสัญญาณอินพุต (มิลลิโวลต์)	ขนาดสัญญาณเอาต์พุต (โวลต์)	อัตราขยาย
4	0.8	200
8	1.64	205
12	2.48	206.67
16	3.20	200
20	4.00	200
24	4.76	198.33
อัตราขยายเฉลี่ย		200
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		3.33



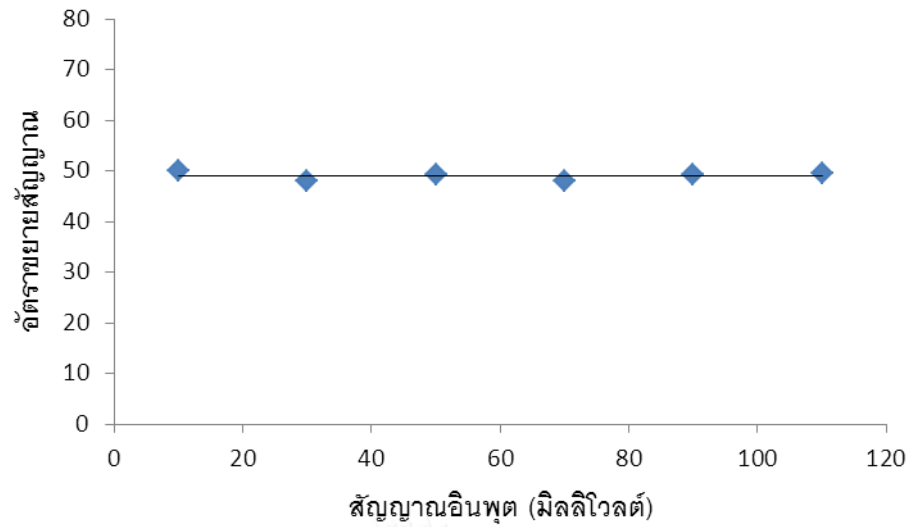
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตที่อัตราขยาย 50 เท่า



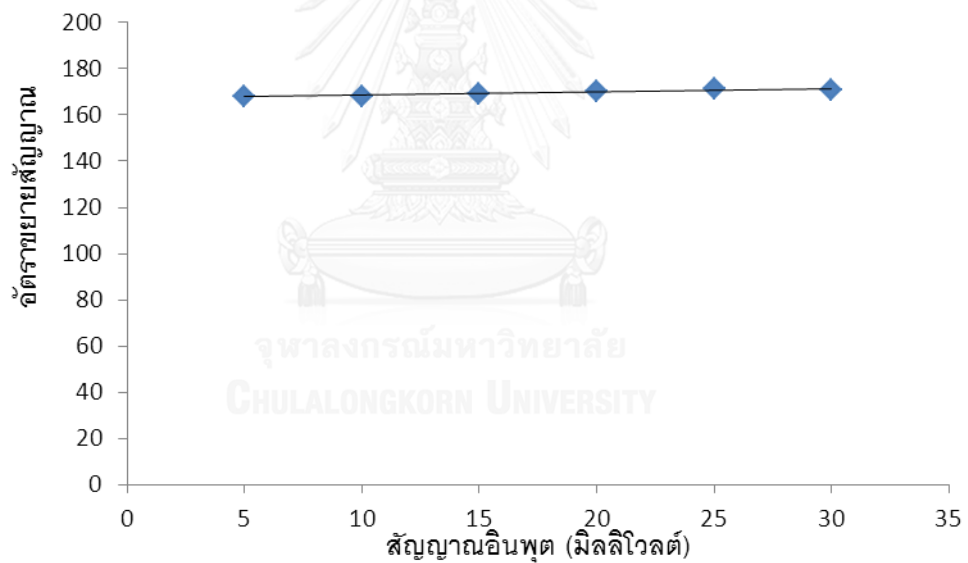
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตที่อัตราขยาย 170 เท่า



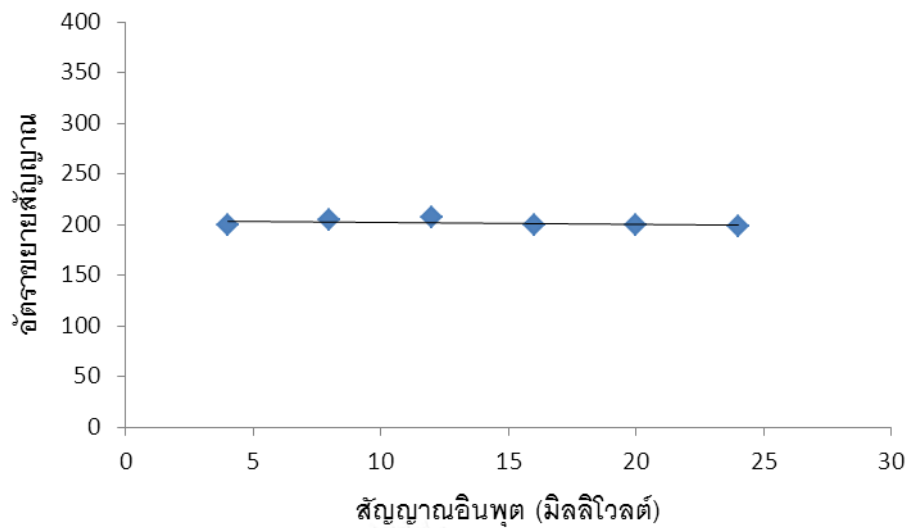
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตที่อัตราขยาย 200 เท่า



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและอัตรายายสัญญาณ 50 เท่า



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและอัตรายายสัญญาณ 170 เท่า



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและอัตรายายสัญญาณ 200 เท่า

4.2.5 การทดสอบความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตรายายแบบอินทิกรัล

จากข้อมูลของกราฟในรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13 สามารถนำมาค่าหาความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตรายายแบบอินทิกรัล (Integral Non-linearity) จากสมการ (1) ซึ่งผลการหาเปอร์เซ็นต์ของความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตรายายแบบอินทิกรัลแสดงในตารางที่ 1

$$INL = \left| \frac{G - G_L}{G_{max}} \right| \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ INL แทน ความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตรายายแบบอินทิกรัล

G แทน ความสูงของสัญญาณพัลส์จากกราฟที่มีค่าเบี่ยงเบนสูงสุด

G_L แทน ความสูงของสัญญาณพัลส์จากกราฟเส้นตรง

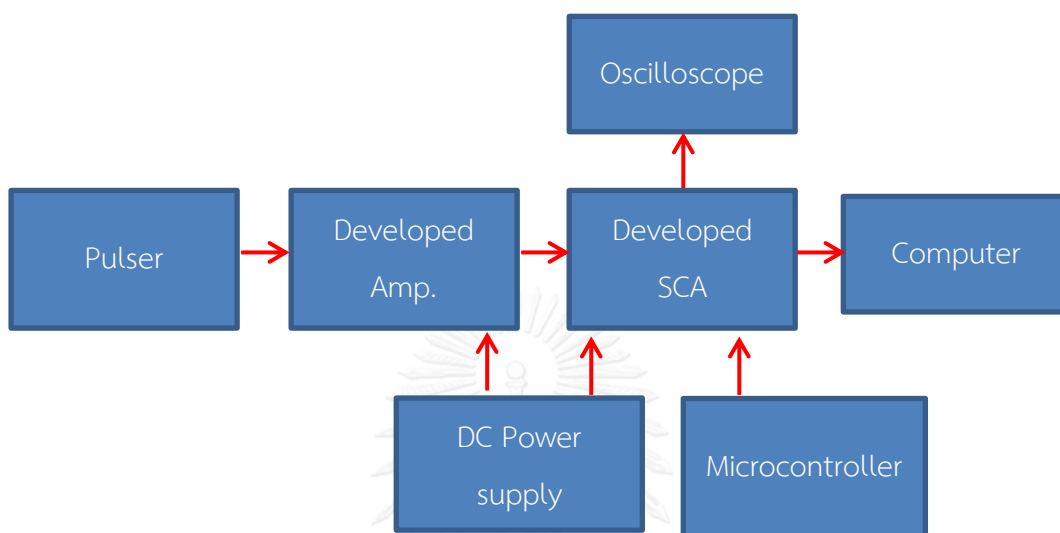
G_{max} แทน ความสูงของสัญญาณพัลส์เอาต์พุตสูงสุดที่ได้จากกราฟ

ตารางที่ 4.4 ความไม่เป็นเชิงเส้นของอัตรายายแบบอินทิกรัลที่อัตรายาย 50, 170 และ 200 เท่า

อัตรายาย	50	170	200
INL (%)	0.30	0.17	1.29

4.2 การทดสอบวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยว

ทำการทดสอบโดยรับสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์จากแหล่งกำเนิดพัลส์เพื่อทดสอบสมรรถนะที่ระบบวิเคราะห์ความสูงพัลส์แบบช่องเดี่ยวสามารถแปลงสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ให้เป็นสัญญาณลอจิกพัลส์ก่อนเข้าสู่วงจรมิติเตอร์



รูปที่ 4.14 การจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยวที่พัฒนาขึ้น

4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์เลียนแบบหัววัดรังสี (Pulser) ของบริษัท CANBERRA รุ่น 814FP
2. วงจรขยายสัญญาณพัลส์ที่พัฒนาขึ้น
3. วงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยวที่พัฒนาขึ้น
4. เครื่องอ่านรูปสัญญาณแบบพกพา (Handheld Oscilloscope) ของบริษัท Siglent รุ่น SHS810
5. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ของบริษัท Hewlett Packard รุ่น 6236B

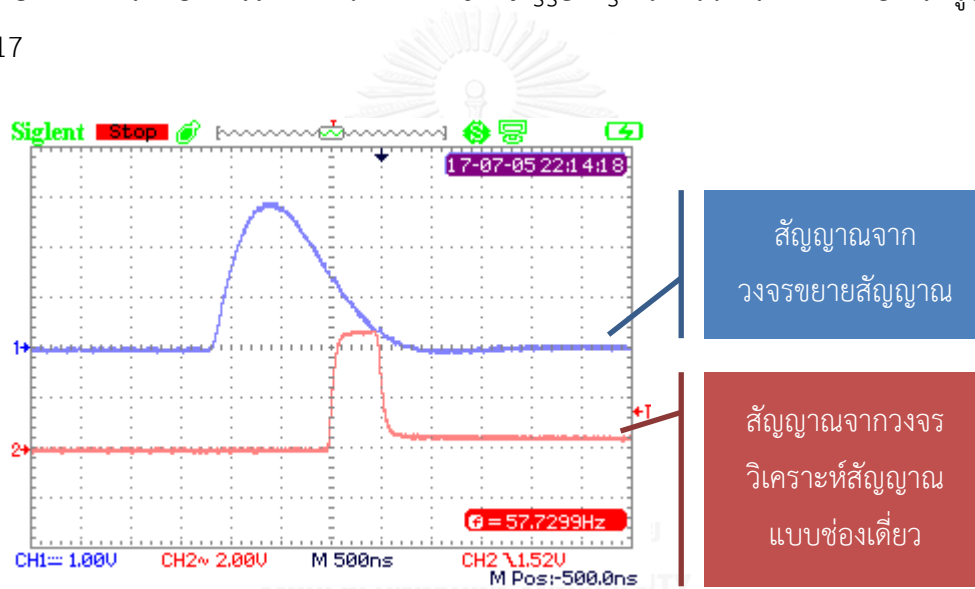
4.3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. จัดอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 4.14
2. ทดสอบสัญญาณเอาต์พุตของวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยวที่พัฒนาขึ้น พร้อมปรับความกว้างของสัญญาณให้มีค่า 500 นาโนวินาที

3. ทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง LLD และ ULD ด้วยการตั้งค่าช่องวิเคราะห์ความสูงด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ 48.875 มิลลิโวลต์ (สเตป=10) ปรับระดับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง LLD และความสูงของสัญญาณพัลส์อินพุต แล้วบันทึกแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง LLD และ ULD ณ ตำแหน่งที่เกิด Half triggering

ผลการทดสอบ

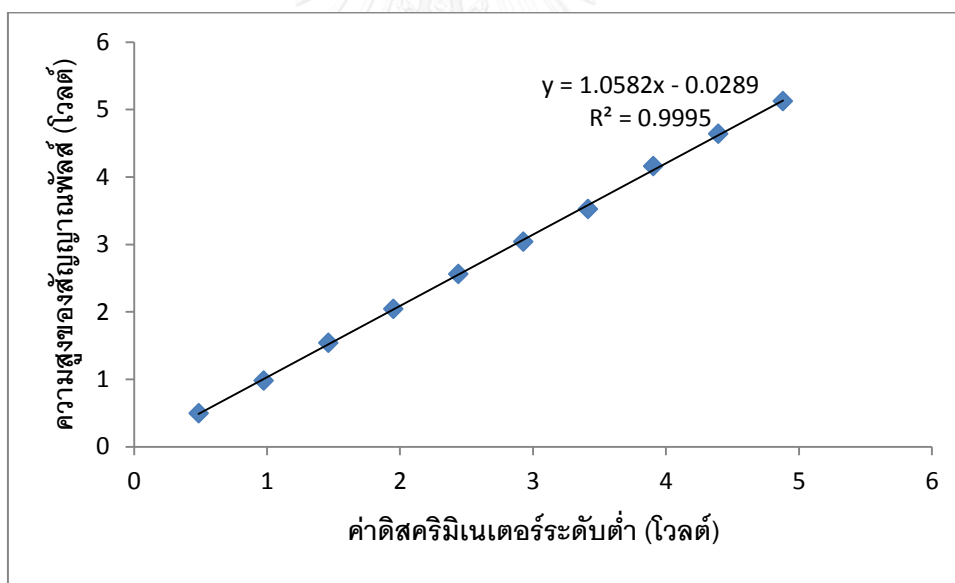
ผลการทดสอบสัญญาณเอาต์พุตของวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยวที่พัฒนาขึ้น เกิดสัญญาณลอจิกพัลส์ที่ขอบขาของสัญญาณพัลส์ของวงจรถ่ายสัญญาณ ขนาดความกว้างของสัญญาณมีค่า 500 นาโนวินาที ดังแสดงในรูปที่ 57 ผลทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง LLD และ ULD ณ ตำแหน่งที่เกิด Half triggering แสดงในตารางที่ 12-13 และรูปที่ 4.15-4.17



รูปที่ 4.15 รูปสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดี่ยวที่พัฒนาขึ้น

ตารางที่ 4.5 ผลทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง LLD

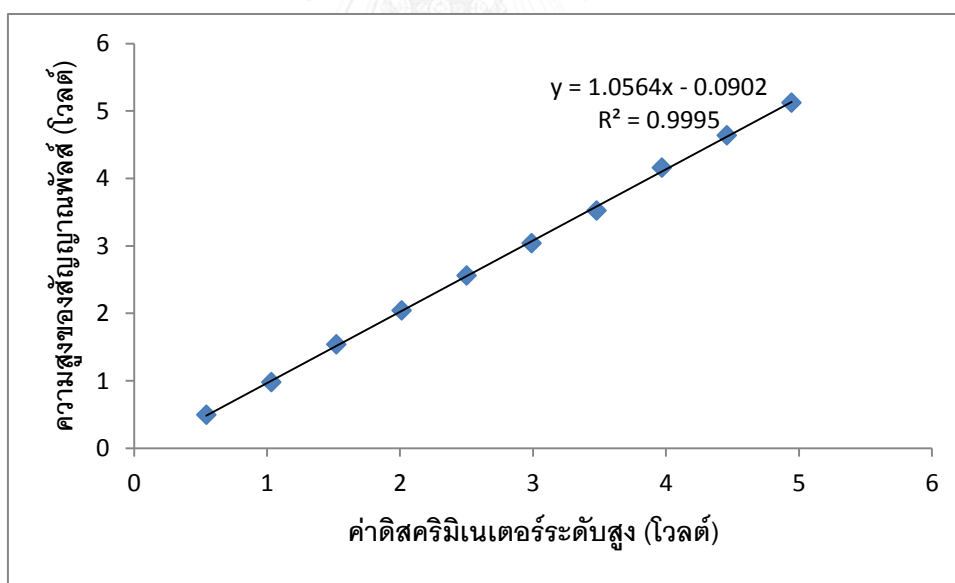
ค่าดิสคริเมเนเตอร์ระดับต่ำ (โวลต์)	ความสูงของสัญญาณพัลส์ (โวลต์)
0.486	0.496
0.974	0.98
1.461	1.54
1.949	2.04
2.438	2.56
2.926	3.04
3.414	3.52
3.903	4.16
4.392	4.64
4.880	5.12



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง LLD และ ช่องวิเคราะห์สัญญาณกับความสูงของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์

ตารางที่ 4.6 ผลทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ULD

ค่าดิสคริเมเนเตอร์ระดับสูง (โวลต์)	ความสูงของสัญญาณพัลส์ (โวลต์)
0.5435	0.496
1.033	0.98
1.522	1.54
2.011	2.04
2.501	2.56
2.99	3.04
3.479	3.52
3.968	4.16
4.457	4.64
4.945	5.12



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ULD และ ช่องวิเคราะห์สัญญาณกับความสูงของสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์

4.3.1 การทดสอบขนาดช่องวิเคราะห์สัญญาณ

ทดสอบการเลือกขนาดช่องวิเคราะห์สัญญาณเป็นการทดสอบว่าควรเลือกขนาดขนาดช่องวิเคราะห์สัญญาณ รวมทั้งเวลาการวัดในแต่ละครั้งควรมีค่าเท่าใด เพื่อทราบถึงเวลาที่อุปกรณ์ทำงาน กำหนดในช่วงความถี่ของเรตมิเตอร์และทราบรูปร่างของสเปกตรัม การสแกนของวงจรวเคราะห์พลังงานแบบช่องเดียวสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์

4.3.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

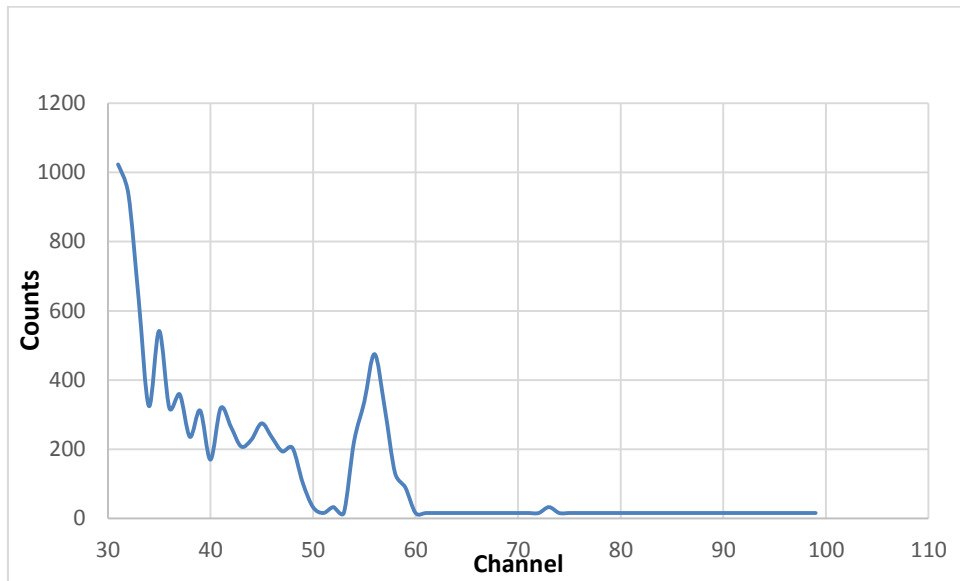
1. ทำการจัดอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 4.14
2. กำหนดสแตปในการสแกน เวลาที่ใช้ในการสแกนแต่ละ window ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ บันทึกค่าที่วัดได้และคำนวณเวลาที่ใช้ในการสแกนทั้งหมดโดยผ่านการเชื่อมต่อผ่าน Serial Communication
3. ตั้งค่าขนาดช่องวิเคราะห์สัญญาณของวิเคราะห์สัญญาณแบบช่องเดียวที่เลือกไว้ปรับระดับ LLD โดยโปรแกรมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ บันทึกระดับ LLD และ ULD เพื่อหาความเสถียรของ window เมื่อระดับ LLD เปลี่ยนไป

ผลการทดสอบ

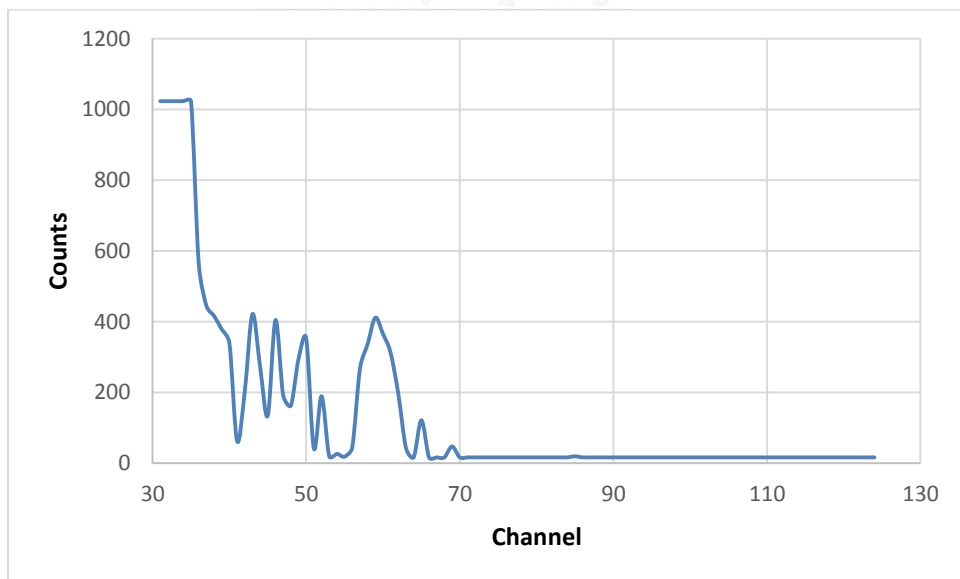
ตารางที่ 4.7 เวลาที่ใช้ในการสแกนเมื่อขนาด window ต่างกัน

สแตป	ขนาด Window (มิลลิโวลต์)	เวลาที่ใช้ในการ สแกนแต่ละ window	เวลาที่ใช้ในการ สแกนทั้งหมด (วินาที)
10	48.875	1	102
		10	1,020
		12	1,224
11	53.763	1	93
		10	930
		12	1,116
12	58.65	1	85
		10	850
		12	1,020

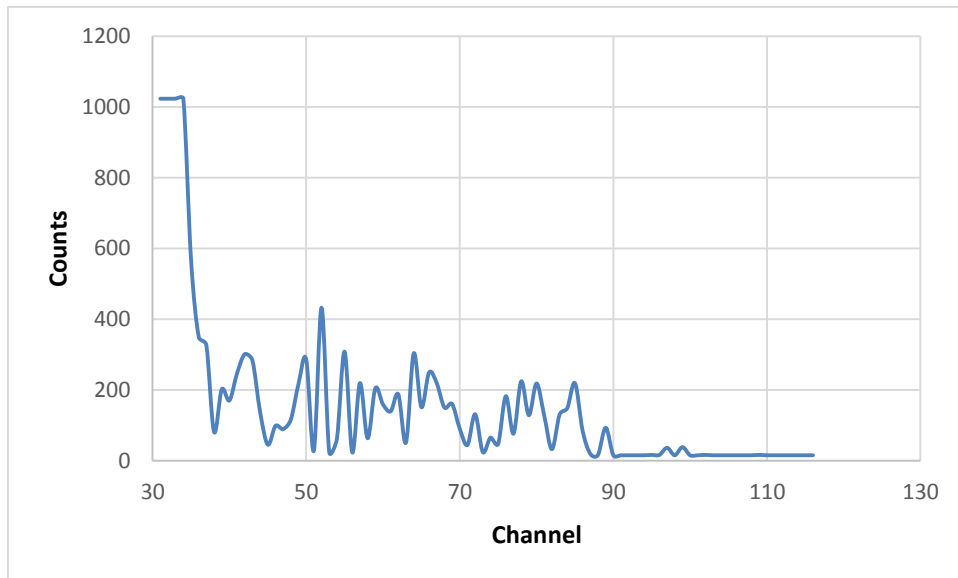
13	63.54	1	78
		10	780
		12	936



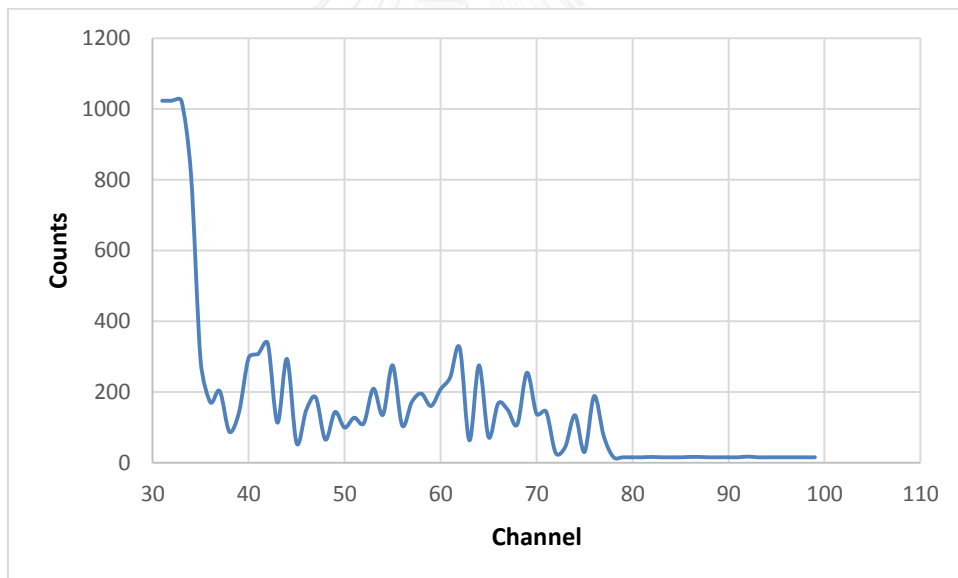
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมของสารรังสีซีเซียม-137 ที่สแตปเท่ากับ 10 และใช้เวลา 1 วินาที สแกนในแต่ละ window



รูปที่ 4.19 สเปกตรัมของสารรังสีซีเซียม-137 ที่สแตปเท่ากับ 11 และใช้เวลา 1 วินาที สแกนในแต่ละ window



รูปที่ 4.20 สเปกตรัมของสารรังสีโคบอลต์-60 ที่สเตปเท่ากับ 12 และใช้เวลา 1 วินาที สแกนในแต่ละ window

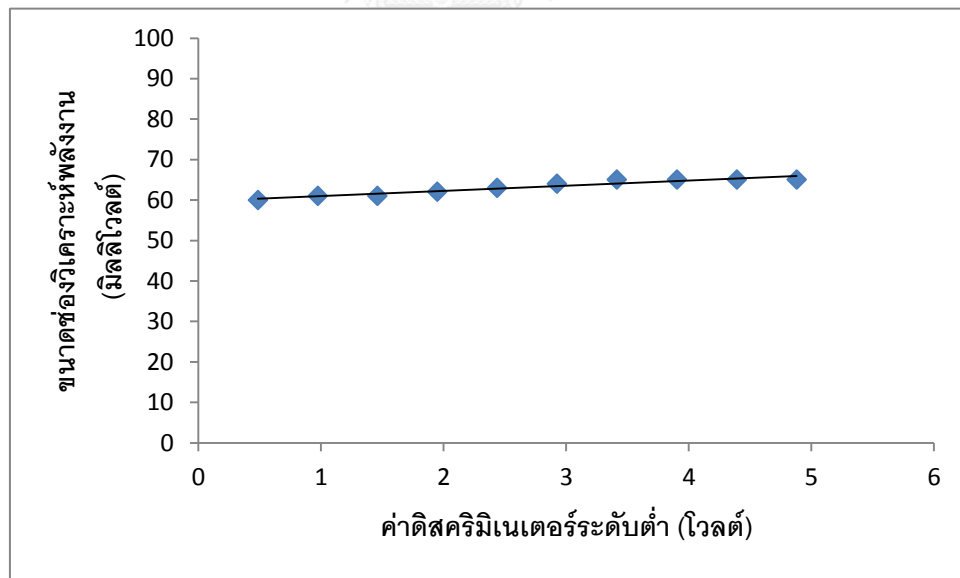


รูปที่ 4.21 สเปกตรัมของสารรังสีโคบอลต์-60 ที่สเตปเท่ากับ 15 และใช้เวลา 1 วินาที สแกนในแต่ละ window

จากตารางที่ 14 พบว่าควรใช้เวลาที่ใช้ในการสแกนแต่ละ window น้อยและสเปกตรัมที่ได้ต้องมีรูปร่างดีพอจะแยกความแตกต่างได้ จึงเลือกขนาดช่องวิเคราะห์สัญญาณที่ 48.875 มิลลิโวลต์ หรือ 10 สเตป โดยแต่ละสเตปใช้เวลาวัด 10 มิลลิวินาที 100 รอบ จึงใช้เวลา 1 วินาที ในการสแกน 1 window

ตารางที่ 4.8 ระดับ LLD, ULD และ Window จาก SCA

ค่าดิสคริเมเนเตอร์ ระดับต่ำ (โวลต์)	ค่าดิสคริเมเนเตอร์ ระดับสูง (โวลต์)	ขนาดช่องวิเคราะห์ สัญญาณ (มิลลิโวลต์)
0.486	0.546	60
0.974	1.035	61
1.461	1.522	61
1.949	2.011	62
2.438	2.501	63
2.926	2.99	64
3.414	3.479	65
3.903	3.968	65
4.392	4.457	65
4.88	4.945	65
ค่าเฉลี่ย		63.1



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง window กับ LLD เมื่อระดับ LLD เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 4.22 สามารถหา Differential Non-Linearity ได้จากสมการ (2)

$$DNL(\%) = \left(\frac{\Delta V_w}{V_w} \right) * 100 \dots \dots \dots (2)$$

เมื่อ DNL คือ เปอร์เซ็นต์ความไม่เป็นเชิงเส้นในอัตราขยายแบบดิฟเฟอเรนเชียล

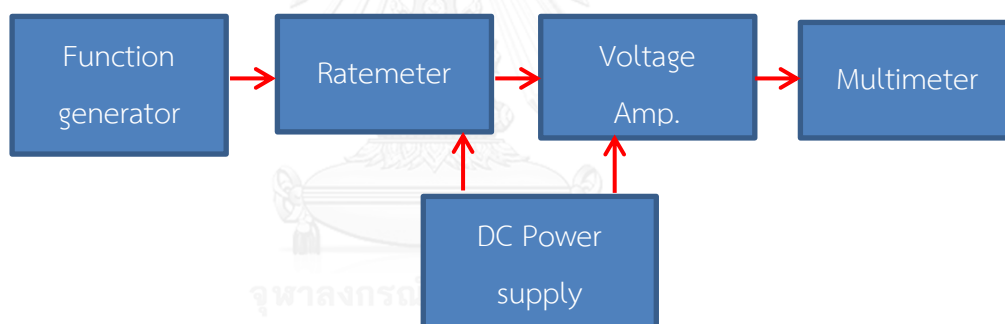
ΔV_w คือ ค่าความแตกต่างของ window ที่มากที่สุดและน้อยที่สุด (โวลต์)

V_w คือ ค่าเฉลี่ยของ window (โวลต์)

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } DNL(\%) &= \left(\frac{5}{63.1} \right) * 100 \\ &= 7.92 \% \end{aligned}$$

4.5 การทดสอบวงจรเรตมิเตอร์และวงจรรขยายแรงดันไฟฟ้า

เมื่อสัญญาณผ่านการคัดเลือกและสแกนจากวงจรพลังงานแบบช่องเดียวจะเข้าสู่วงจรเรตมิเตอร์เพื่อแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย ได้ทำการทดสอบวงจรเรตมิเตอร์ทั้ง 4 ช่วงความถี่และต่อกับวงจรรขยายแรงดันไฟฟ้าเพื่อทดสอบความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากวงจรทั้งสอง โดยจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบวงจรเรตมิเตอร์และวงจรรขยายแรงดันไฟฟ้า

4.5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. วงจรเรตมิเตอร์
2. วงจรรขยายแรงดันไฟฟ้า
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ของบริษัท Hewlett Packard รุ่น 6236B
4. เครื่องกำเนิดความถี่ (Function generator) ของบริษัท GWInstek รุ่น GFG3015
5. มัลติมิเตอร์ ของบริษัท sanwa รุ่น PC5000

4.5.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ป้อนสัญญาณอินพุตในโหมด TTL จากเครื่องกำเนิดความถี่ โดยกำหนดความถี่ จากขา 9 (Control) และ 10 (Selector) ของไอซีเบอร์ 4052 ในวงจรเรตมิเตอร์ที่กำหนด ช่วงความถี่ไว้
2. จ่ายแรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ ให้วงจรเรตมิเตอร์และ ± 12 โวลต์ ให้วงจรขยายแรงดันไฟฟ้า
3. บันทึกขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วยมัลติมิเตอร์ ทั้งเมื่อผ่านวงจรเรตมิเตอร์และ วงจรขยายแรงดันไฟฟ้า พร้อมปรับแรงดันที่เอาต์พุตของเรตมิเตอร์ให้เป็น 100 มิลลิโวลต์ และปรับอัตราขยายแรงดันให้เอาต์พุตมีขนาด 3.3 โวลต์

ผลการทดสอบ

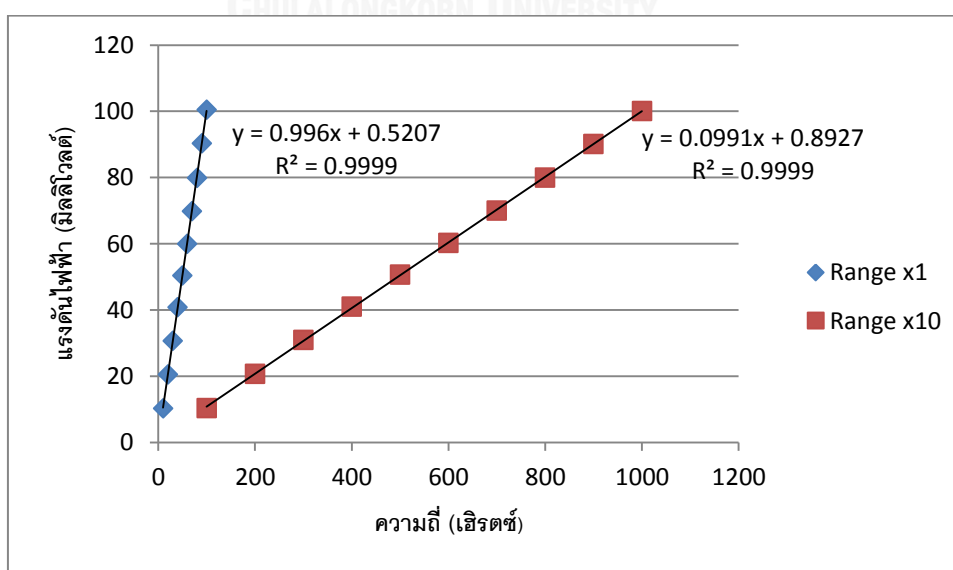
ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรเรตมิเตอร์และวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าเมื่อเทียบกับ ความถี่ที่ป้อนเข้าไปทั้ง 4 ช่วง แสดงในตารางที่ 16-17 และรูปที่ 67-69

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรเรตมิเตอร์และวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าในช่วง ความถี่ X1 และ X10

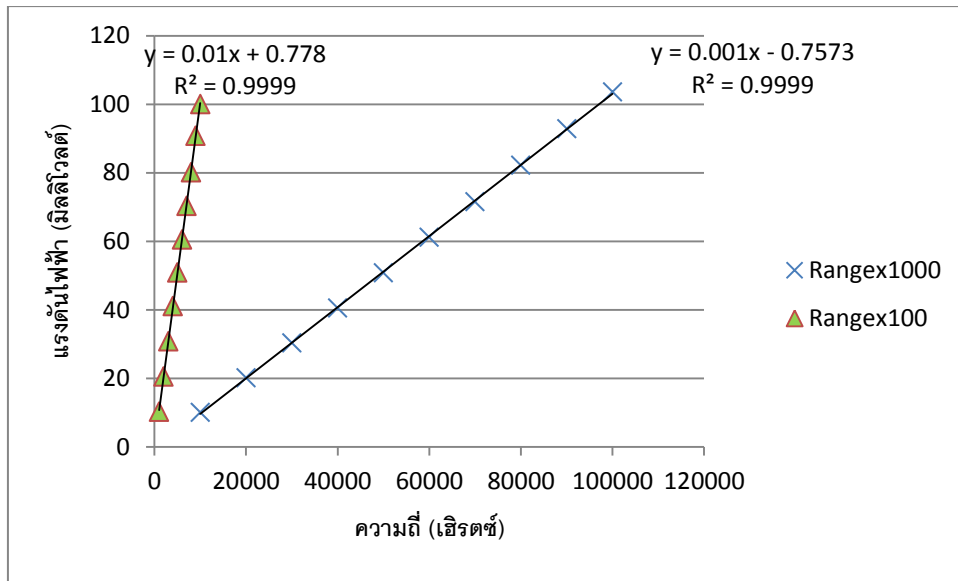
X1			X10		
ความถี่ (เฮิรตซ์)	แรงดันไฟฟ้า จากเรตมิเตอร์ (มิลลิโวลต์)	แรงดันไฟฟ้าเมื่อ ผ่านวงจรขยาย แรงดัน (โวลต์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	แรงดันไฟฟ้า จากเรตมิเตอร์ (มิลลิโวลต์)	แรงดันไฟฟ้าเมื่อ ผ่านวงจรขยาย แรงดัน (โวลต์)
10	10.25	0.3297	100	10.37	0.3866
20	20.48	0.7058	200	20.66	0.7252
30	30.68	1.0505	300	30.91	1.0635
40	40.77	1.3510	400	41.03	1.3965
50	50.41	1.6427	500	50.69	1.7147
60	59.95	1.9454	600	60.24	2.0262
70	69.80	2.2628	700	69.98	2.3089
80	79.90	2.5923	800	79.96	2.6391
90	90.29	2.9421	900	90.11	2.9740
100	100.47	3.3067	1000	100.10	3.3012

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรเรตมิเตอร์และวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าในช่วง
ความถี่ X100 และ X1000

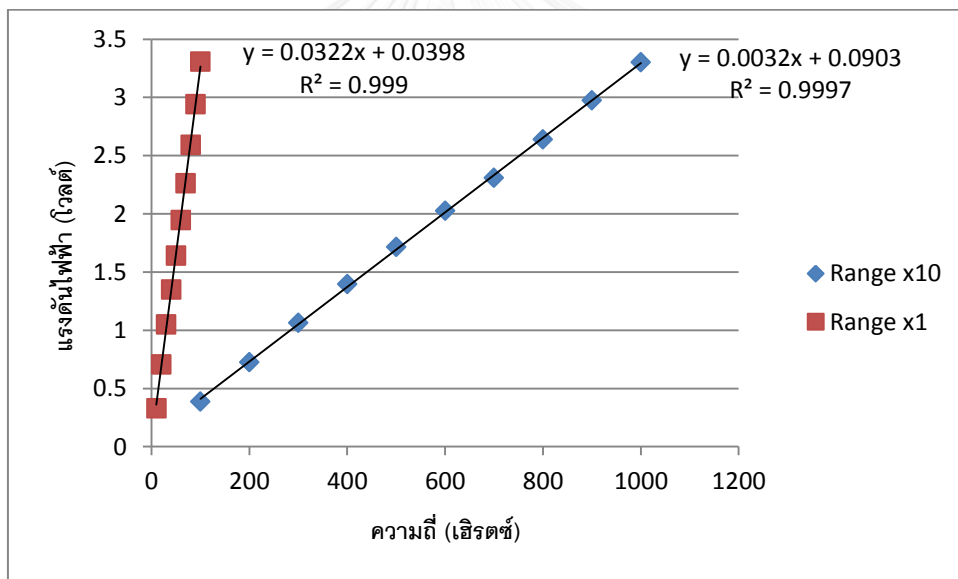
X100			X1000		
ความถี่ (เฮิรตซ์)	แรงดันไฟฟ้า จากเรตมิเตอร์ (มิลลิโวลต์)	แรงดันไฟฟ้า เมื่อผ่าน วงจรขยาย แรงดัน (โวลต์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	แรงดันไฟฟ้า จากเรตมิเตอร์ (มิลลิโวลต์)	แรงดันไฟฟ้า เมื่อผ่าน วงจรขยาย แรงดัน (โวลต์)
1000	10.30	0.3742	10000	10.12	0.3283
2000	20.56	0.7077	20000	20.13	0.6554
3000	30.83	1.0409	30000	30.38	0.9800
4000	41.08	1.3194	40000	40.50	1.3182
5000	50.89	1.6363	50000	50.77	1.6357
6000	60.53	1.9898	60000	61.17	1.9829
7000	70.34	2.3046	70000	71.55	2.3256
8000	80.15	2.6303	80000	82.14	2.6685
9000	90.75	2.9625	90000	92.79	3.0101
10000	100.05	3.2935	100000	103.58	3.3680



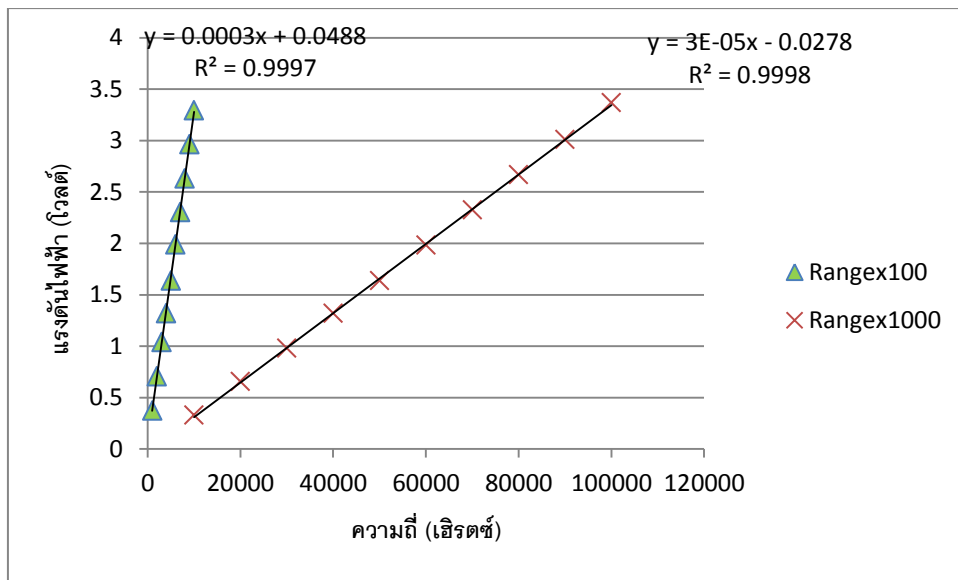
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าจากเรตมิเตอร์ในช่วง Range x1 และ x10



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าจากเรตมิเตอร์ในช่วง Range x100 และ x1000



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าจากวงจรถยายแรงดันไฟฟ้าในช่วง Range x1 และ x10

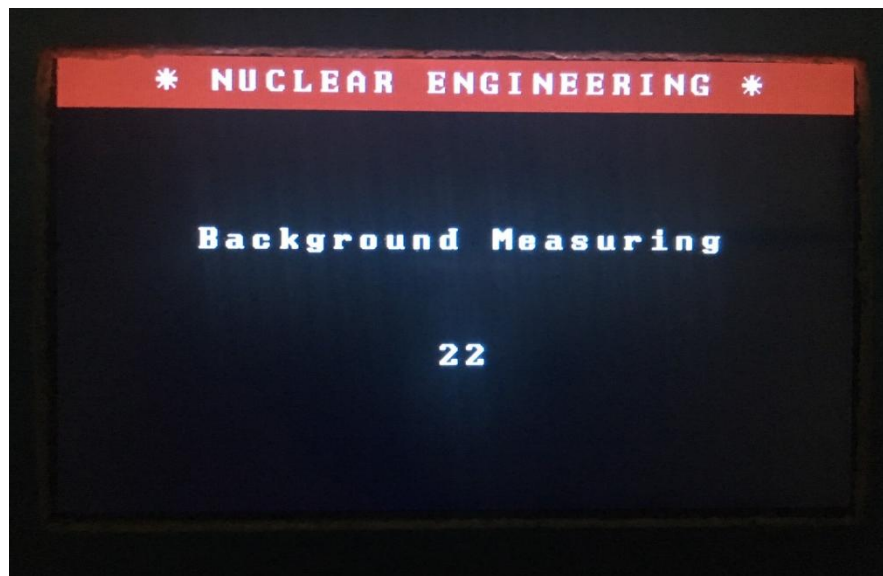


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดันไฟฟ้าจากวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าในช่วง Range x100 และ x1000

เนื่องจากเรตมิเตอร์สามารถทำงานได้ใน 4 ช่วงความถี่แต่อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้นจะใช้ช่วงความถี่เดียว ซึ่งจากการทดสอบพบว่าช่วงความถี่ที่เหมาะสมคือช่วง X1 โดยต่อขา 9 และ ขา10 ของไอซีเบอร์ 4052 ลง ground จากนั้นสัญญาณจะเข้าสู่ ADC ของส่วนควบคุมการแสดงผลต่อไป

4.6 การทดสอบอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้น

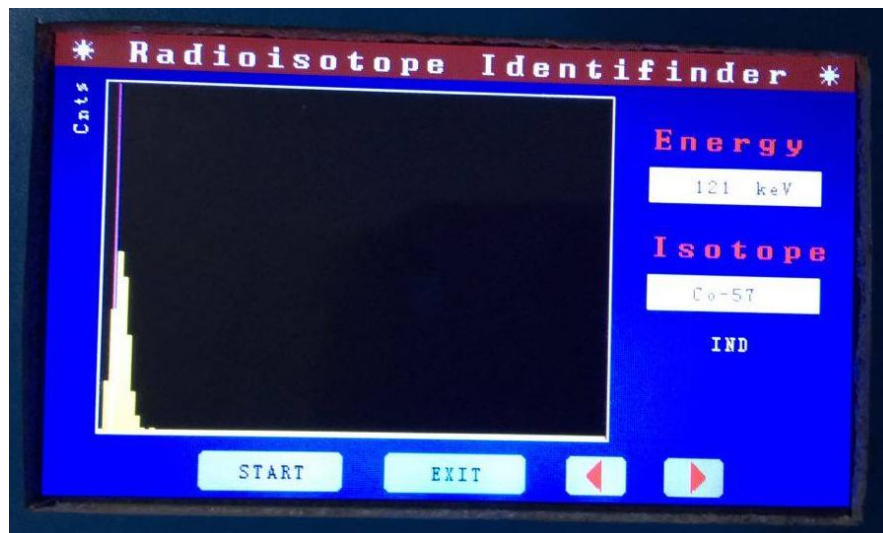
หลังจากทดสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วพร้อมกับเขียนโปรแกรมเชื่อมโยงสัญญาณกับจอแสดงผล จึงทดสอบกับสารรังสีมาตรฐาน โคบอลต์-57 ความแรง 1.05 ไมโครคูรี ซีเซียม-137 ความแรง 0.48 ไมโครคูรี และโคบอลต์-60 ความแรง 7.56 ไมโครคูรี โดยวางชิดหัววัดรังสี เมื่อเปิดเครื่องใช้เวลาวัดค่า Background 92 วินาที จากนั้นจึงเข้าสู่หน้าเมนูหลัก ดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ เมื่อกด Start พบว่าใช้เวลาในการสแกน 92 วินาที และเมื่อเลื่อนตัวชี้ตำแหน่งไปยังจุดกึ่งกลางของโพโตฟิกลสามารถระบุชนิดไอโซโทปและพลังงานทั้ง 3 ไอโซโทปดังกล่าวได้อย่างถูกต้อง ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.30-4.32 ตามลำดับ



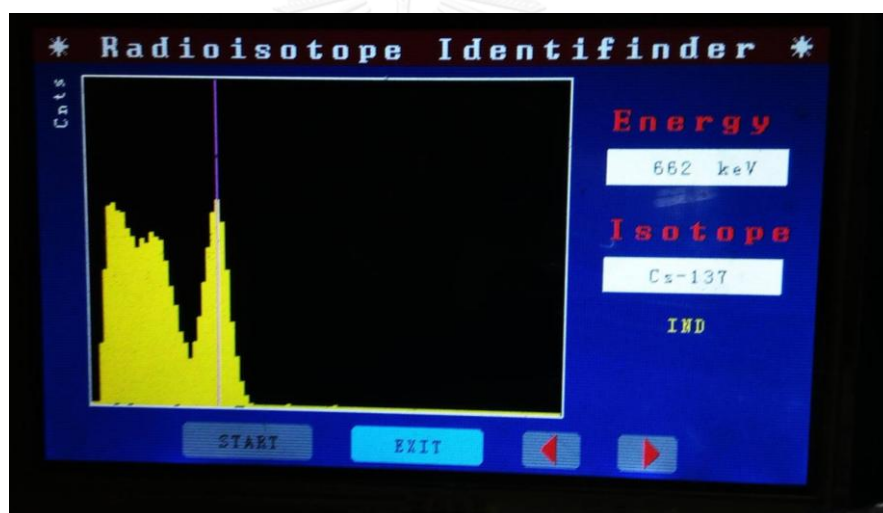
รูปที่ 4.28 หน้าจอแสดงผลหลังจากเปิดเครื่อง



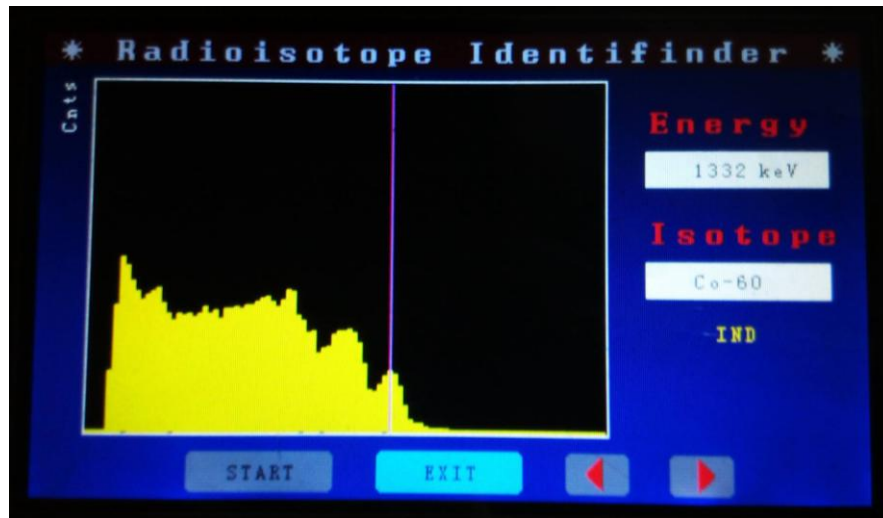
รูปที่ 4.29 หน้าเมนูหลักของอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 4.30 สเปกตรัมรังสีแกมมาของโคบอลต์-57



รูปที่ 4.31 สเปกตรัมรังสีแกมมาของซีเซียม-137



รูปที่ 4.32 สเปกตรัมรังสีแกมมาของโคบอลต์-60



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบการทำงานของระบบต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ระบุไอโซโทปรังสีแบบพกพา และการประกอบต้นแบบอุปกรณ์ระบุไอโซโทปรังสีและนำไปทดสอบการทำงาน สามารถสรุปผลการพัฒนาอุปกรณ์ระบุไอโซโทปรังสีแบบพกพา ได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลการทดสอบหัววัดรังสีพร้อมวงจรรขยายส่วนหน้า

สัญญาณพัลส์นิวเคลียร์จากหัววัดรังสีชนิดผลึกซินทิลเลเตอร์ CsI (Tl) ประกอบกับโฟโตไดโอดชนิดพินผ่านวงจรรขยายส่วนหน้า เมื่อทำการวัดรังสีแกมมาจากสารรังสีมาตรฐานซีเซียม-137 พบว่าสัญญาณพัลส์มีขนาด 10-20 มิลลิโวลต์ และ โคบอลต์-60 สัญญาณพัลส์มีขนาด 20-30 มิลลิโวลต์ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการจำแนกความแตกต่างพลังงานของไอโซโทปรังสีจากหัววัดรังสีนี้ สัญญาณพัลส์มีค่าเวลาการสลายตัวประมาณ 125 ไมโครวินาที และมี DC offset เกิดขึ้นประมาณ 10 มิลลิโวลต์

5.1.2 ผลการทดสอบวงจรรขยายสัญญาณพัลส์

วงจรรขยายสัญญาณพัลส์นิวเคลียร์ที่พัฒนาขึ้นมีอัตราการขยาย 50-200 เท่า สัญญาณมีลักษณะกึ่งเกาส์เซียน ความกว้างของพัลส์ที่ฐานประมาณ 6 ไมโครวินาที มีอัตราการขยายคงที่ มีความเป็นเชิงเส้นสูงในทุกอัตราการขยาย และเมื่อใช้งานกับหัววัดรังสีจริงพร้อมปรับเทียบพลังงาน พบว่าต้องใช้อัตราขยาย 170 เท่า จึงได้ความสูงของสัญญาณพัลส์จากซีเซียม-137 มีค่าประมาณ 1.6 โวลต์และโคบอลต์-60 มีค่าประมาณ 3 โวลต์ ตามที่ต้องการ

5.1.3 ผลการทดสอบวงจรวินิจฉัยพลังงานแบบช่องเดี่ยว

วงจรวินิจฉัยพลังงานแบบช่องเดี่ยวสามารถสร้างสัญญาณลอจิกพัลส์ที่มีความกว้าง 500 นาโนวินาที สามารถปรับระดับ LLD, Window และ ULD ด้วยการควบคุมของไมโครคอนโทรลเลอร์ ผลทดสอบการแปรเปลี่ยนระดับของ LLD และ ULD ที่ความสูงของพัลส์ทำให้เกิด Half triggering มีความเป็นเชิงเส้นสูง ขนาดของ window เฉลี่ยที่ใช้ในอุปกรณ์นี้คือ 63.1 มิลลิโวลต์ และเมื่อขนาด window คงที่แล้วระดับแรงดัน LLD เปลี่ยนไป ยังคงรักษาขนาดของ window ได้ มีค่า Differential Non-Linearity เท่ากับ 7.92%

5.1.4 ผลการทดสอบวงจรเรตมิเตอร์และวงจรขยายแรงดันไฟฟ้า

แม้ว่าอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้นจะใช้การทำงานของวงจรเรตมิเตอร์ 1 ช่วง แต่วงจรเรตมิเตอร์นี้สามารถเลือกการทำงานได้ 4 ช่วง คือ สเกล X1 X10 x100 และ x1000 ทุกช่วงการทำงานจะให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 100 มิลลิโวลต์ มีความเป็นเชิงเส้นสูงในทุกช่วงการทำงาน และเมื่อผ่านวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าแล้วก็ยังมีความเป็นเชิงเส้นที่ดีเช่นเดิม โดยให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 3.3 โวลต์ ตามที่ต้องการ ช่วงการทำงานที่เหมาะสมของวงจรเรตมิเตอร์คือ ช่วงสเกล X1

5.1.5 ผลการทดสอบอุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีเมื่อประกอบเสร็จ

หลังจากวัดเสร็จเมื่อเลื่อนตัวบ่งชี้ไปยังกึ่งกลางของโฟโตพิก อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้นสามารถระบุชนิดไอโซโทปรังสีของ โคบอลต์-57 ความแรง 1.05 ไมโครคูรี ซีเซียม-137 ความแรง 0.48 ไมโครคูรี และโคบอลต์-60 ความแรง 7.56 ไมโครคูรี ได้อย่างถูกต้อง โดยใช้เวลาวัดครั้งละ 92 วินาที

5.2 คุณลักษณะของเครื่องมือ

อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจรรังสีแกมมาและระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พลังงานตั้งแต่ 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ แต่ไม่เกิน 2 เมกาอิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยการสแกนของวงจรวิเคราะห์พลังงานแบบช่องเดียว 1024 ช่องพลังงาน ควบคุมการทำงานผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ หน้าจอแสดงผลเป็นชนิดสี ใช้แบตเตอรี่ขนาด 3.7 โวลต์ 3 ก้อนและสามารถใช้งานติดต่อกันได้อย่างน้อย 2 ชั่วโมง ควรเปิดเครื่องในบริเวณที่ไม่มีรังสีหรือก่อนเข้าทำการตรวจวัดเพื่อให้เครื่องวัดค่าเบ็คกราวนด์ให้แล้วเสร็จ จึงเคลื่อนย้ายไปตรวจวัดจุดกัมมันตรังสีหรือบริเวณที่มีการแผ่รังสีแกมมา โดยกดปุ่ม Start เพื่อให้อุปกรณ์เริ่มทำงานรอจนแล้วเสร็จซึ่งใช้เวลา 92 วินาที จะแสดงสเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมา จากนั้นเลื่อนตัวบ่งชี้ตำแหน่งไปยังจุดกึ่งกลางของพิก ซึ่งสามารถเลื่อนได้ตำแหน่งละ 21 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ หากจุดกึ่งกลางพิกนั้นมีตำแหน่ง channel ตรงกับฐานข้อมูลพลังงานไอโซโทปรังสีที่บันทึกไว้ จะแสดงไอโซโทปรังสี หมวดหมู่ของไอโซโทปรังสีตัวนั้น และพลังงานในหน่วยกิโลอิเล็กตรอนโวลต์

5.3 ปัญหาและอุปสรรค

5.3.1 หัววัดรังสีที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้เป็นหัววัดชนิดผืนก Csl (TI) ประกบกับพินโฟโตไดโอดขนาด 10 x 10 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นหัววัดที่มีขนาดเล็กที่มีความเหมาะสมสำหรับการวัดรังสีแบบแจก

แฉงพลังงาน แต่จากงานวิจัยพบว่ามีความถี่ขนาดเล็กเกินไปทำให้ประสิทธิภาพของหัววัดชนิดนี้ยังไม่ดีพอ และมีการกระเจิงคอมป์ตันสูง

5.3.2 อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้นยังมีขนาดใหญ่และมีสัญญาณรบกวนอยู่ ซึ่งไม่สามารถระบุชนิดไอโซโทปที่มีพลังงานของรังสีแกมมาต่ำกว่า 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ได้

5.3.3 อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้นสามารถระบุชนิดไอโซโทปที่ปล่อยรังสีแกมมาพลังงานที่มีความแตกต่างกัน 2 เท่าของ FWHM ของหัววัดรังสี และต้องเป็นไอโซโทปรังสีเดี่ยวหรือถ้าหลายไอโซโทปปล่อยรังสีแกมมาต้องไม่ซ้อนทับกัน

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 จากข้อจำกัดในเรื่องหัววัดรังสี หากนำระบบไปใช้กับหัววัดรังสีที่มีผลึกซินทิลเลเตอร์ขนาดใหญ่ขึ้นจะลดการกระเจิงคอมป์ตันลง สเปกตรัมพลังงานจะชัดเจนขึ้นและทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นตามไปด้วย

5.4.2 ในการแสดงผลอาจหาอัลกอริทึมอื่น ๆ ในการลดระดับการกระเจิงคอมป์ตันและสัญญาณรบกวนลง

5.4.3 อาจเพิ่มฟังก์ชันการใช้งานให้ทันสมัยยิ่งขึ้นเช่น ระบบสัมผัส (Touch screen) หรือมีโปรแกรม Search peak เพื่อระบุชนิดไอโซโทปอัตโนมัติ ช่วยแก้ปัญหากรณีพลังงานของรังสีแกมมาซ้ำกับไอโซโทปใด ๆ

5.3.4 อุปกรณ์ระบุชนิดไอโซโทปรังสีที่พัฒนาขึ้นมีต้นทุนไม่สูงมากนัก สามารถนำไปใช้งานประกอบการเรียนการสอน ศึกษวิจัยเพิ่มเติมได้

รายการอ้างอิง



รายการอ้างอิง

1. นवलฉวี รุ่งชนเกียรติ. 2553. **นิวเคลียร์เทคโนโลยี : พื้นฐานและการประยุกต์ใช้ด้านดินและพืช**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
2. นवलฉวี รุ่งชนเกียรติ. 2545. **วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
3. System Assessment and Validation for Emergency Responders (SAVER). 2009 **Radioisotope Identification Devices (RIIDs)**. U.S. Department of Homeland Security.
4. Knoll, Glenn F. **Radiation Detection and Measurement**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1999.
5. ธวัช ชิตตระการ. 2541. **การตรวจและวัดรังสี**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
6. ดุสิต เครื่องาม. 2542. **พินโฟโตไดโอด (P-I-N Photodiode)**. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยีและการใช้งาน**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
7. Ortec. n.d. **Modular Pulse-Processing Electronics Catalog**. Advanced Measurement Technology, Inc. U.S.A.
8. Mangclaviraj, V., S.Punnachaiya and B.Ounpanich. 1989. **Nuclear instrumentation laboratory Manual**. Chulalongkorn University, Bangkok.
9. ศศิวิมล ช่วยดำรงค์. 2555. **ความรับผิดชอบต่อความเสียหายทางนิวเคลียร์**. วิทยานิพนธ์นิติศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
10. American National Standards Institute. 2015. **ANSI Standard 42.34-2015 “American National Standard Performance Criteria for Hand Held Instruments for the Detection and Identification of Radionuclides”**.
11. ทันพงษ์ ภูริรักษ์. **เอกสารการสอนวิชาไมโครคอนโทรลเลอร์เบื้องต้น**. สาขาวิชาเมคคาทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี.

12. Jizck L. Parker. 1991. Instrumentation for Gamma-Ray Spectroscopy. **Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials**. Los Alamos National Laboratory. NM, USA





ภาคผนวก ก

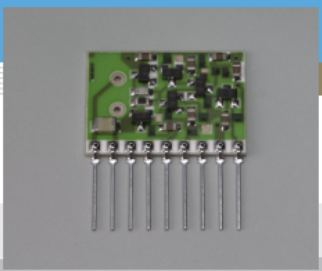
ตารางที่ 1 รายละเอียดของ ซีลีคอนฟิโนโตไดโอด รุ่น H3590-08

Photosensitive area	10 × 10 mm
Number of elements	1
Package	Ceramic
Reverse voltage (max.)	100 V
Spectral response range	340 to 1100 nm
Peak sensitivity wavelength (typ.)	960 nm
Photosensitivity (typ.)	0.66 A/W
Dark current (max.)	6000 pA
Cutoff frequency (typ.)	40 MHz
Terminal capacitance (typ.)	40 pF
Measurement condition	Ta=25 °C, Typ., unless otherwise noted, Photosensitivity: $\lambda = \lambda_p$, Dark current: $V_R = 70$ V, Cutoff frequency: $V_R = 70$ V, Terminal capacitance: $V_R = 70$ V, $f = 1$ MHz

MODULE

Charge amplifier H4083

For radiation and high energy particle detection



H4083 is a low-noise hybrid charge amplifier designed for a wide range of spectrometric applications including soft X-ray and low to high energy gamma-ray spectrometry. The first stage of this amplifier uses a low-noise junction type FET, which exhibits excellent performance when used with a photodiode having a large junction capacitance. H4083 is especially suited for use with Hamamatsu S3590/S3204 series, etc. Si PIN photodiodes. S3590 series photodiodes can be directly mounted on the backside of H4083, so there will be no increase in stray capacitance. H4083 is compact and lightweight, making detector design and development more flexible.

Features

- Low noise
- Compact and lightweight
- Easy handling

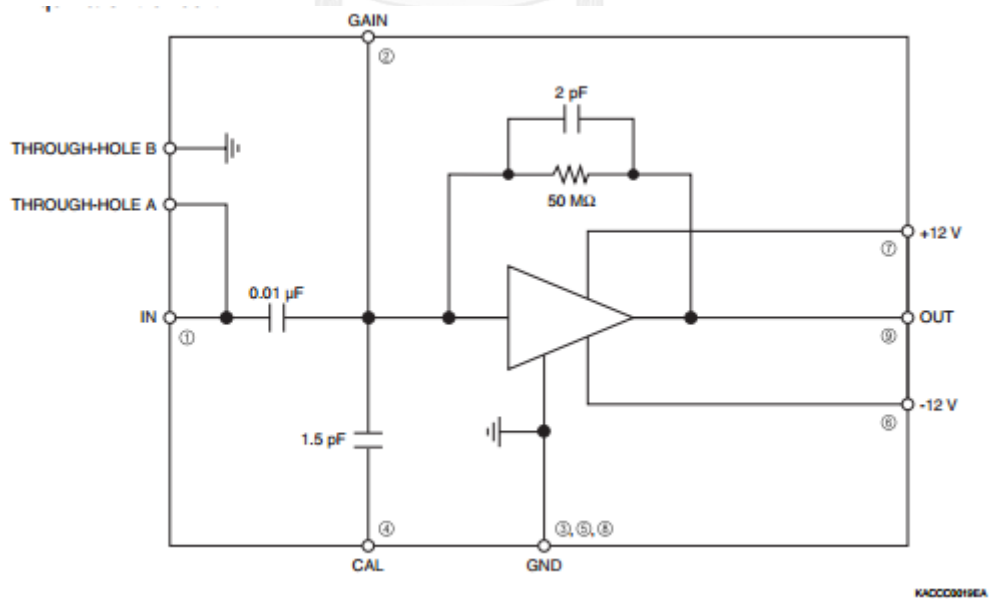
Applications

- Detection of X-rays, radiation, high energy particles

■ Specification

Parameter	Specification
Amplification method	Charge-sensitive type
Input/output polarity	Inverted
Charge gain	0.5 V/pC
	22 mV/MeV (Si)
Noise characteristic	550 electrons/FWHM
Negative feedback constant	50 MΩ/2 pF
Power supply	±12 V
Power consumption	150 mW
Configuration	9-pin, single line type
Dimensional outline	24 (W) × 19 (H) × 4 (T) mm

รูปที่ 1 รายละเอียดของวงจรขยายสัญญาณส่วนหน้า



รูปที่ 2 วงจรขยายสัญญาณส่วนหน้า

ภาคผนวก ข

ตารางที่ 2 นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ปล่อยรังสีแกมมา

Gamma Energy (KeV)	Nuclide	Half-Life	Percent Yield per decay
8	Er-169	9.4 days	0.3
22	Sm-151	87 years	4
24	Sn-199m	250 days	16
30	Ba-140	12.8 days	11
31	Mg-28	21 hours	96
35	I-125	60 days	7
35	Te-125m	58 days	7
37	Br-80m	4.38 hours	36
40	Rh-103m	57 minutes	0.4
40	I-129	1.7x10 ⁷ years	9
47	Pb-210	21 years	4
51	Rh-104m	4.41 minutes	47
53	Te-132	78 hours	17
58	Gd-159	18.0 hours	3
58	Dy-159	144 days	4
59	Te-127m	109 days	0.19
60	Am-241	458 years	36
63	Yb-169	32 days	45
63	Th-234	24.1 days	3.5
68	Ta-182	115 days	42
68	Ti-44	48 hours	90
70	Sm-153	47 hours	5.4
77	Pt-197	18 hours	20
77	Hg-197	65 hours	18
78	Ti-44	48 hours	98
80	Ba-133	10.51 years	36
81	Ho-166	26.9 hours	5.4
81	Xe-133	5.27 days	37
84	Tm-170	130 days	3.3
84	Th-228	1.90 years	1.6
87	Eu-155	1.81 years	32
88	Pd-109 / Ag-109m	13.47 hours / 40 seconds	5
88	Cd-109 / Ag-109m	453 days / 40 seconds	5
88	Lu-176m	3.7 hours	10
91	Nd-147	11.1 days	28
93	Th-234	24.1 days	4
95	Dy-165	139.2 minutes	4
99	Gd-153	242 days	55
99	Au-195	183 days	10
100	Pa-234	6.75 hours	50
103	Sm-153	47 hours	28
104	Sm-155	23 minutes	73
105	Eu-155	1.81 years	20
113	Lu-177	6.7 days	2.8
122	Co-57	270 days	87
122	Eu-152	12 years	37

Gamma Energy (KeV)	Nuclide	Half-Life	Percent Yield per decay
123	Eu-154	16 years	38
124	Ba-131	12 days	28
128	Cs-134m	2.9 hours	14
129	Os-191	15 days	25
133	Hf-181	42.5 days	48
134	Ce-144	284 days	11
136	Hg-197m	24 hours	42
137	Re-186	90 hours	9
140	Tc-99m	6 hours	90
143	U-235	7.1 x 10 ⁸ years	11
145	Ce-141	33 days	48
147	Ta-182m	16.5 minutes	40
150	Te-131	25 minutes	68
150	Cd-111m	48.6 minutes	30
150	Kr-85m	4.4 hours	74
155	Re-188	16.7 hours	10
158	Au-199	75.6 hours	37
163	Ba-140	12.8 days	6
164	Xe-131m	11.8 days	2
166	Ba-139	82.9 minutes	23
172	Ta-182m	16.5 minutes	40
185	U-235	7.1 x 10 ⁸ years	54
186	Ra-226	1602 years	4
191	Mo-101	14.6 minutes	25
191	Pt-197	18 hours	6
192	In-114m	50.0 days	17
198	Yb-169	32 days	35
208	Lu-177	6.7 days	6.1
210	Ge-77	11.3 hours	61
215	Hf-180m	5.5 hours	82
215	Ru-97	2.9 days	91
230	Te-132	78 hours	90
233	Xe-133m	2.26 days	14
239	Pb-212	10.64 hours	47
239	As-77	38.7 hours	2.5
246	Sm-155	23 minutes	4
247	Cd-111m	48.6 minutes	94
250	Xe-135	9.2 hours	91
255	Sn-133	115 days	1.8
263	Ge-77	11.3 hours	45
265	Ge-75	82 minutes	11
265	Se-75	120.4 days	60
279	Hg-203	46.9 days	77
284	I-131	8.05 days	5.4
286	Pm-149	53.1 hours	2
293	Ce-143	33 hours	46
295	Pb-214	26.8 minutes	19
299	Tb-160	72.1 days	30
305	Kr-85m	4.4 hours	13
307	Tc-101	14.0 minutes	91
308	Er-171	7.52 hours	63
310	Pa-233	27.0 days	44

Gamma Energy (KeV)	Nuclide	Half-Life	Percent Yield per decay
317	Ir-192	74.2 days	81
319	Nd-147	11.1 days	3
320	Cr-51	27.8 days	9
325	Sn-125m	9.7 minutes	97
328	Ir-194	17.4 hours	10
333	Hf-180m	5.5 hours	93
335	Cd-115 / In-115m	53.5 hours / 4.5 hours	50
342	Ag-111	7.5 days	6
344	Eu-152	12 years	27
351	Bi-211	2.15 minutes	14
352	Pb-214	26.8 minutes	36
356	Ba-133	10.51 years	69
360	Se-83	25 minutes	69
362	Pd-103	17 days	0.06
363	Gd-159	18.0 hours	9
364	I-131	8.05 days	82
368	Ni-65	2.56 hours	4.5
388	Sr-87m	2.83 hours	80
393	Sn-113	115 days	64
393	In-133m	100 minutes	64
403	Kr-87	76 minutes	84
405	Pb-211	36.1 minutes	3.4
412	Au-198	2.698 days	95
427	Sb-125	2.7 years	31
439	Zn-69m	13.8 hours	95
441	I-128	25.0 minutes	14
444	Hf-180m	5.5 hours	80
468	Ir-192	74.2 days	49
477	Be-7	53 days	10.3
479	W-187	23.9 hours	23
482	Hf-181	42.5 hours	81
487	La-140	40.22 hours	40
490	Cd-115	53.5 hours	10
496	Ba-131	12 days	48
497	Ru-103	39.6 days	88
511	Cu-64	12.8 hours	38
511	Ga-68	68.3 minutes	176
511	As-74	17.9 days	59
511.0034	Na-22	2.60 years	180
512	Ru-106 / Rh-106	367 days / 30 seconds	21
514	Sr-85	64 days	100
514	Kr-85	10.76 years	0.41
520	Se083	25 minutes	59
527	Xe-135m	15.6 minutes	80
530	I-133	21 hours	90
530	Cd-115	53.5 hours	26
533	Nd-147	11.1 days	13
537	Ba-140	12.8 days	34
538	I-130	12.4 hours	99
554	Br-82	35.34 hours	66
559	As-76	26.5 hours	43
564	Sb-122	67 hours	66

Gamma Energy (KeV)	Nuclide	Half-Life	Percent Yield per decay
570	Bi-207	30 years	98
583	Tl-208	3.10 minutes	86
596	As-74	17.9 days	61
599	Sb-125	2.7 years	24
603	Sb-125	60 days	97
605	Cs-134	2.05 years	98
609	Bi-214	19.7 minutes	47
619	Br-82	35.34 hours	41
622	Ru-106 / Rh-106	367 days / 30 seconds	11
637	I-131	8.05 days	6.8
658	Ag-110m	253 days	96
658	Ag-110	24.4 seconds	4.5
661.64	Cs-137 / Ba-137m	30 years / 2.55 minutes	85
669	I-130	12.4 hours	100
670	I-132	2.3 hours	144
686	W-187	23.9 hours	27
695	Pr-144	17.3 minutes	1.5
697	Te-129m	34 days	6
724	Zr-95	65 days	49
726	Ru-105	4.44 hours	48
727	Bi-212	60.6 minutes	7
740	Mo-99	67 hours	12
743	I-130	12.4 hours	87
747	Zr-97 / Nb-97m	17.0 hours / 60 seconds	92
748	Sr-91	9.67 hours	27
756	Zr-95	65 days	49
765	Nb-95	35 days	100
773	I-132	2.3 hours	89
777	Br-82	35.34 hours	83
780	Te-131m	30 hours	60
796	Cs-134	2.05 years	99
810	Co-58	71.3 days	99
832	Pb-211	36.1 minutes	3.4
835	Ga-72	14.10 hours	96
834.827	Mn-54	303 days	100
837	Mn-56	2.58 hours	99
850	Te-131m	30 hours	31
879	Tb-160	72.1 days	31
885	Ag-110m	253 days	71
889	Sc-46	83.9 days	100
898	Rb-88	17.8 minutes	13
900	Pa-234	6.75 hours	70
935	Cd-115m	43 days	1.9
966	Tb-160	72.1 days	31
1020	Mo-101	14.6 minutes	25
1025	Sr-91	9.67 hours	30
1063	Bi-207	30 years	77
1078	Ba-68	68.3 minutes	3.5
1095	Fe-59	45 days	56
1115	Zn-65	245 days	49
1115	Ni-65	2.56 hours	16
1120	Sc-46	83.9 days	100

Gamma Energy (KeV)	Nuclide	Half-Life	Percent Yield per decay
1120	Bi-214	19.7 minutes	17
1122	Ta-182	115 days	34
1140	I-135	6.7 hours	37
1173.2	Co-60	5.26 years	100
1210	Y-91	58.8 days	0.3
1274.5	Na-22	2.60 years	100
1278	Eu-154	16 years	37
1280	I-135	6.7 hours	34
1292	Fe-59	45 days	44
1293	In-116m	54.0 minutes	80
1293	Ar-41	1.83 hours	99
1308	Ca-47	4.53 days	74
1332.5	Co-60	5.26 years	100
1350	Mg-28	21 hours	70
1369	Na-24	15.0 hours	100
1380	Ho-166	26.9 minutes	0.9
1408	Eu-152	12 years	22
1426	Cs-138	32.2 minutes	73
1434	V-52	3.76 minutes	100
1460	K-40	1.29 x 10 ⁹ years	11
1481	Ni-65	2.56 hours	25
1524	K-42	12.4 hours	18
1570	Pr-142	19.2 hours	3.7
1596	La-140	40.22 hours	96
1600	Cl-38	37.3 minutes	38
1692	Sb-124	60 days	50
1764	Bi-214	19.7 minutes	17
1780	Al-28	2.31 minutes	100
1811	Mn-56	2.58 hours	29
2614	Tl-208	3.10 minutes	100
2754	Na-24	15.0 hours	100
6130	N-16	7.2 seconds	69
7110	N-16	7.2 seconds	5

ภาคผนวก ค

ไมโครคอนโทรลเลอร์ Chipkit UNO 32

chipKIT™ Uno32™ Board
Reference Manual

Revision: July 21, 2011



1300 NE Henley Court, Suite 3
 Pullman, WA 99163
 (509) 334 6306 Voice | (509) 334 6300 Fax

Overview

The chipKIT Uno32 is a microcontroller board based on the Microchip PIC32MX320F128H, a member of the 32-bit PIC32 microcontroller family. The chipKIT boards are compatible with the popular Arduino™ microcontroller board shields.

The Uno32 is designed to be easy to use and suitable for use by anyone from beginners to advanced users for experimenting with electronics and embedded control systems. The Uno32 is intended to be used with the Multi-Platform IDE, (modified Arduino IDE), MPIDE, and contains everything needed to start developing embedded applications.

The Uno32 provides 42 I/O pins that support a number of peripheral functions, such as UART, SPI and I²C™ ports and pulse width modulated outputs. Twelve of the I/O pins can be used as analog inputs or as digital inputs and outputs.

The Uno32 can be powered via USB, an external AC-DC power adapter, or batteries.

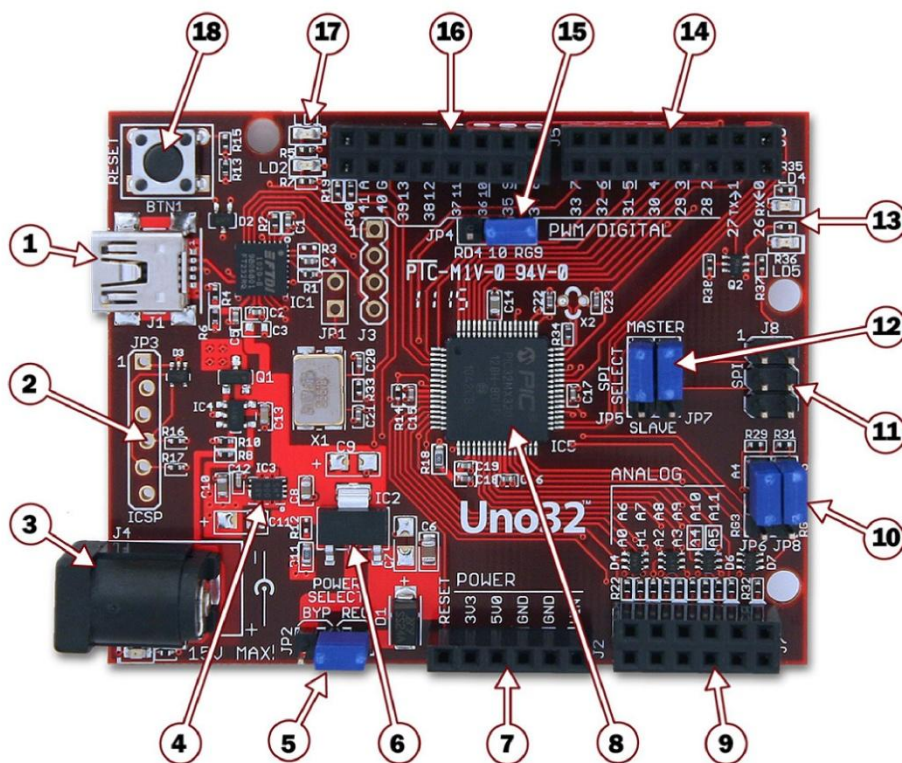
Specifications:

Microcontroller: PIC32MX320F128H
 Flash Memory: 128K
 RAM Memory: 16K
 Operating Voltage: 3.3V
 Operating Frequency: 80Mhz
 Typical operating current: 75mA
 Input Voltage (recommended): 7V to 15V
 Input Voltage (maximum): 20V
 I/O Pins: 42 total
 Analog Inputs: 12
 Analog input voltage range: 0V to 3.3V
 DC Current per pin: +/-18mA



chipKIT Uno32 Hardware Overview

The Uno32 has the following hardware features:



1) USB Connector for USB Serial Converter

This connects to a USB port on the PC to provide the communications port for the MPIDE to talk to the Uno32 board. This can also be used to power the Uno32 board when connected to the PC.

2) JP3 – Microchip Debug Tool Connector

This connector is used to connect Microchip programmer/debugger tools, such as the PICkit™3. This allows the Uno32 board to be used as a traditional microcontroller development board using the Microchip MPLAB® IDE.

- 3) J4 – External Power Connector
This is used to power the Uno32 board from an external power supply. This is a 5.5mm x 2.1mm barrel connector. It is wired with the center terminal as the positive supply voltage. The power supply voltage must be in the range 7V to 15V.
- 4) Power Supply – 3.3V regulator
Voltage regulator for the 3.3V power supply. This power supply can provide up to 500mA of current.
- 5) JP2 – Power Select Jumper
This jumper is used to route power from the external power connector through the on-board 5V voltage regulator or to bypass the 5V regulator. The REG position routes power through the 5V regulator. The BYP position bypasses the on-board 5V regulator. With this jumper in the BYP position the maximum input voltage that can be applied at the external power connector is 6V.
- 6) Power Supply – 5V regulator
On-Board 5V voltage regulator. This regulates the input voltage applied at the external power connector to 5V. This is used to power the 3.3V regulator and to provide 5V power to shields. This regulator can provide up to 800mA of current.
- 7) J2 – Shield Power Connector
This connector provides power to I/O expansion shields connected to the board.
- 8) PIC32 Microcontroller
This is the PIC32MX320F128H microcontroller that is the main processor for the board.
- 9) J7 – Analog Signal Connector
This connector provides access to analog/digital I/O pins on the microcontroller.
- 10) JP6/JP7 – A4/A5 Signal Select Jumpers
These jumpers are used to switch pins 9 & 11 on connector J7 between analog inputs A4 and A5 or the I²C signals SDA and SCL
- 11) J8 – SPI Signal Connector
This connector provides alternative access to the SPI signals. This is used by some shields for access to the SPI bus.
- 12) JP5/JP7 – SPI Master/Slave Select Jumpers
These jumpers are used to switch the SPI signals for use of the Uno32 board as an SPI master device or as an SPI slave device. Both jumpers should be switched together. Place the shorting blocks in the MASTER position for master operation and in the SLAVE position for slave operation. Normally, these jumpers are in the MASTER position.
- 13) User LEDs
Two LEDs connected to digital signal pins 13 and 43.
- 14) J6 – Digital Signal Connector
This connector provides access to digital I/O pins on the microcontroller.
- 15) JP4 – Pin 10 Signal Select Jumper

This jumper is used to switch connector J5 pin 5 (digital signal 10) between pulse width modulator (PWM) operation and SPI operation. The jumper is placed in the RD4 position for PWM output and in the RG9 position for SPI operation.

16) J5 – Digital Signal Connector

This connector provides access to digital I/O pins on the microcontroller.

17) Communications Status LEDs

These LEDs indicate activity on the USB serial interface.

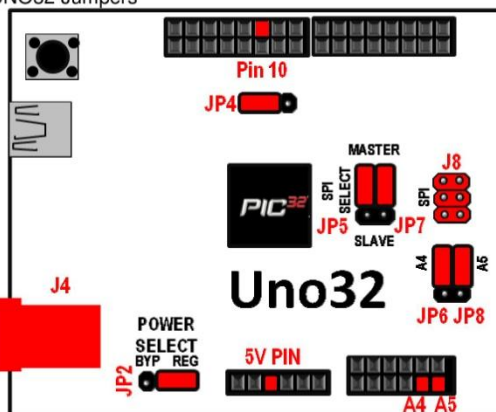
18) Reset Button

This button can be used to reset the microcontroller, restarting operation from the boot loader.

chipKIT Uno32 Jumper Settings

The chipKIT™ Development Platforms use a Microchip PIC32 Microcontroller. These are 32-bit products that bring unprecedented features to the Arduino™ community. In order to maintain compatibility with existing hardware/software while maintaining user accessibility to these advanced features, additional jumpers and row headers are provided. This document describes the functionality of the jumpers listed in figure 1.

Figure 1: chipKIT™ UNO32 Jumpers



Jumper	Function
--------	----------

JP2	POWER SELECT: Used to connect/bypass on-board 5V regulator when using an external power supply connected to J4
-----	--



J4 supply is regulated (i.e. 5V will be present on 5V pin)



J4 supply bypasses regulator (i.e. Supply voltage will be present on 5V pin)

Note: A 3.3V on-board regulator will always be enable regardless of JP2 settings to protect the PIC32 MCU

Not sure what this does? Play it safe and keep JP2 on the two right-most pins. (i.e. J4 supply is regulated)

JP4	PWM/DIGITAL SELECT: Configures pin 10 on J5 to be used as a PWM output or a Digital Input/Output.
-----	---

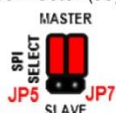


Pin 10 configured as a Digital Input/Output

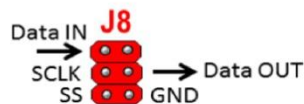


Pin 10 configured as a PWM output

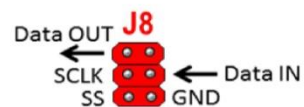
JP5/JP7 SPI SELECT: Used to configure the chipKIT™ as either a Master or Slave when using the SPI (Serial Peripheral Interface). The chipKIT™ board can be connected to another device or even another chipKIT™ through the SPI connector (J8).



chipKIT™ configured as a SPI Master



chipKIT™ configured as a SPI Slave



For more information on SPI, please visit Wikipedia's SPI page at:
http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus#Mode_Numbers

JP6/JP8 I²C/ANALOG PIN SELECT: Used to configure A4 and A5 for functionality as an Analog input or to be used as I²C communication pins.



A4 and A5 on J7 are configured to be used as analog inputs



A4 and A5 are configured to be used as I2C communication lines (A4 – SDA, A5 – SCL)

For more information on I²C, please visit Wikipedia's I2C page at:
<http://en.wikipedia.org/wiki/I2C>

chipKIT Uno32 Hardware Description

MPIDE and USB Serial Communications

The Uno32 board is designed to be used with the Multi-Platform IDE (MPIDE). The MPIDE development platform was produced by modifying the Arduino™ IDE and is fully backward compatible with the Arduino IDE.

The MPIDE uses a serial communications port to communicate with a boot loader running in the Uno32 board. The serial port on the Uno32 board is implemented using an FTDI FT232R USB serial converter. Before attempting to use the MPIDE to communicate with the Uno32, the appropriate USB device driver must be installed.

The Uno32 board uses a standard mini-USB connector for connection to a USB port on the PC.

When the MPIDE needs to communicate with the Uno32 board, the board is reset and starts running the boot loader. The MPIDE then establishes communications with the boot loader and downloads the program to the board.

When the MPIDE opens the serial communications connection on the PC, the DTR pin on the FT232R chip is driven low. This pin is coupled through a capacitor to the MCLR pin on the PIC32 microcontroller. Driving the MCLR line low resets the microcontroller, restarting execution with the boot loader.

This automatic reset action when the serial communications connection is opened can be disabled. To disable this operation, there is a cut-able trace on the bottom of the board between the pins of JP1. JP1 is normally not loaded. If the trace between the pins on JP1 has been cut, the automatic reset operation can be restored by loading JP1 and inserting a shorting block across it.

Two red LEDs (LD1 and LD2) will blink when data is being sent or received between the Uno32 and the PC over the serial connection.

The header connector J3 provides access to the other serial handshaking signals provided by the FT232R. Connector J3 is not loaded at the factory and can be installed by the user to access these signals.

Power Supply

The Uno32 is designed to be powered either from USB or from an external power supply. There is an automatic switchover circuit that causes the external supply to be used if both supplies are present.

The power supply section in the Uno32 uses two voltage regulators. The first regulates the external voltage to 5V to power the VCC5V0 bus. The second regulates the VCC5V0 bus to 3.3V to provide power to the VCC3V3 bus that powers the PIC32 microcontroller.

The 5V voltage regulator is normally an NCP1117. The board is designed to be able to also use an LM1117, but the NCP1117 is the part normally used. The NCP1117 is rated for an output current of 1A (the LM1117 is rated for 800mA). The dropout voltage of the NCP1117 is a maximum of 1.2V at the rated output current (1.3V for the LM1117). There is a reverse polarity protection diode in the external power supply circuit. Considering the diode drop plus the forward drop across the regulator, the minimum input voltage to the regulator should be 7V to produce a reliable 5V output. The absolute maximum input voltage of both the NCP1117 and the LM1117 is 20V. The recommended maximum operating voltage is 15V. For input voltages above 9V, the regulator will get extremely hot when drawing high currents. Both the NCP1117 and the LM1117 have output short circuit protection and internal thermal protection and will shut down automatically to prevent damage.

The 3.3V regulator is a Microchip MCP1725. This regulator is rated for a maximum output current of 500mA. The absolute maximum input voltage for the MCP1725 is 6V. This regulator has internal short circuit protection and thermal protection. It will get noticeably warm when the current consumed by the VCC3V3 bus is close to the 500mA maximum.

The 5V power bus, VCC5V0 can be powered from one of three sources: 1) The USB5V0 bus when the board is operating under USB power; 2) The output of the on-board 5V regulator when operating from an external 7V – 15V supply; or 3) Directly from the external supply when operating from a regulated 5V external supply and jumper JP2 is in the BYP position.

Switchover from USB power to external power is done automatically and the external supply will be used if both are present.

Jumper JP2 is used to route the external power supply voltage through the on-board 5V regulator or directly to the VCC5V0 bus, bypassing the on-board 5V regulator. Normally, JP2 should be in the REG position. This routes the external supply through the 5V regulator. Operation from an externally regulated 5V supply is provided by placing the jumper in the BYP position.

The forward drop across the MCP1725 is typically 210mV (350mV max) at 500mA output. With JP2 in the BYP position, this will allow correct operation of the 3.3V power supply from an input voltage down to 3.5V. This allows powering the board from batteries and other lower voltage power sources. In this case, the VCC5V0 power bus will not be powered at 5V.

NOTE: It is extremely important to observe the MCP1725 maximum input voltage rating of 6V when JP2 is in the BYP position. Applying more than 6V to the external power input with the jumper in the BYP position can destroy the 3.3V regulator and possibly the PIC32 microcontroller as well.

The PIC32 microcontroller is rated to use a maximum of 75mA of current when operating at 80Mhz. This allows up to 425mA from the VCC3V3 bus and up to 925mA from the VCC5V0 bus to power external devices.

The POWER connector, J2, is used to provide power to shields connected to the Uno32 board. The following pins are provided on this connector:

P32_RST (pin 1): This connects to the MCLR pin on the PIC32 microcontroller and can be used to reset the PIC32.

VCC3V3 (pin 2): This routes the 3.3V power bus to shields. This pin can provide ~425mA.

VCC5V0 (pin 3): This routes the 5V power bus to shields. This pin can provide up to ~900mA to shields, however to total provided by pins 2 and 3 shouldn't exceed 925mA.

GND (pin 4, 5): This provides a common ground connection between the Uno32 and the shields.

VIN (pin 6): This connects to the voltage provided at the external power supply connector. This can be used to provide unregulated input power to the shield. It can also be used to power the Uno32 board from the shield instead of from the external power connector.

5V Compatibility

The PIC32 microcontroller operates at 3.3V. The original Arduino boards operate at 5V, and many Arduino shields are designed to operate at 5V.

There are two issues to consider when dealing with 5V compatibility for 3.3V logic. The first is protection of 3.3V inputs from damage caused by 5V signals. The second is whether the 3.3V output is high enough to be recognized as a logic high value by a 5V input.

The digital I/O pins on the PIC32 microcontroller are 5V tolerant. The analog capable I/O pins are not 5V tolerant. To

provide 5V tolerance on those pins, the Uno32 contains clamp diodes and current limiting resistors to protect them from 5V input voltages.

The fact that all I/O pins are 5V tolerant means that it is safe to apply 5V logic levels to any pins on the board without risk of damaging the PIC32 microcontroller.

The minimum output high voltage of the PIC32 microcontroller is rated at 2.4V when sourcing 12mA of current. When driving a high impedance input (typical of CMOS logic) the output high voltage will be close to 3.3V. Some 5V devices will recognize this voltage as a logic high input, and some won't. Many 5V logic devices will work reliably with 3.3V inputs.

Input/Output Connections

The Uno32 board provides 42 of the I/O pins from the PIC32 microcontroller to pins on the input/output connectors, J5, J6, and J7.

The PIC32 microcontroller can source or sink a maximum of 18mA on all digital I/O pins. However, to keep the output voltage within the specified voltage range (V_{OL} 0.4V, V_{OH} 2.4V) the pin current must be restricted to +/-12mA. The maximum current that can be sourced or sunk across all I/O pins simultaneously is +/-200mA. The maximum voltage that can be applied to any I/O pin is 5.5V. For more detailed specifications, refer to the PIC32MX3XX/4XX Data Sheet available from the Microchip web site.

Connectors J5 and J6 are 2x8 female pin header connectors that provide digital I/O signals. The outer row (closer to the board edge) of pins on these connectors corresponds to the I/O connector pins on an Arduino Uno or Duemilanove board. The inner row of pins provides access to the extra I/O signals provided by the PIC32 microcontroller.

Connector J7 is a 2x6 female pin header connector that provides access to the analog input pins on the microcontroller. The outer row

of pins corresponds to the six analog pins on an Arduino Uno or Duemilanove. The inner row of pins are the additional I/O signals provided by the PIC32 microcontroller. The analog pins on J7 can also be used as digital I/O pins.

The chipKIT/Arduino system uses logical pin numbers to identify digital I/O pins on the connectors. The logical pin numbers for the I/O pins on the Uno32 are 0 – 43. These pin numbers are labeled in the silk screen on the board.

Pin numbers 0 – 13 are the outer row of pins on J6 and J5, going from right to left. Pin numbers 14 – 19 are the outer row of pins on J7 going left to right. Pins 20 – 25 are the inner row of pins on J7 going left to right. Pin numbers 26 – 41 are the inner row of pins on J6 and J5 going right to left. Pin 42 is the pin labeled A on J5. This pin is normally the reference voltage for the microcontroller's A/D converter, but can also be used as a digital I/O pin.

In addition to the connector pin, Pin 13 also connects to the user LED LD4. Pin 43 connects to user LED LD5. Pin 43 pin does not go to any connector.

The analog inputs on connector J7 are assigned pin numbers. The outer row of pins on J7 are analog inputs A0 – A5. The inner row of pins are A6 – A11. These pins are also assigned digital pin numbers: A0 – A5 are digital pins 14 – 19, and A6 – A11 are 20 – 25..

Peripheral I/O Functions

The PIC32 microcontroller on the Uno32 board provides a number of peripheral functions. The following peripherals are provided:

UART port 1: Asynchronous serial port. Pin 0 (RX), Pin 1 (TX). These pins are connected to I/O connector J6 and are also connected to the FT232R USB serial converter. It is possible to use these pins to connect to an external serial device when not using the USB serial

interface. This uses UART1 (U1RX, U1TX) on the PIC32 microcontroller.

UART port 2: Asynchronous serial port. Pin 39 (RX), Pin 40 (TX). This uses UART2 (U2RX, U2TX) on the PIC32 microcontroller.

SPI: Synchronous serial port. Pin 10 (SS), Pin 11 (MOSI), Pin 12 (MISO), Pin 13 (SCK). These signals also appear on connector J8. Jumpers JP5 and JP7 are used to select whether the Uno32 operates as a Master (transmit on MOSI, receive on MISO) or a Slave (transmit on MISO, receive on MOSI) device. The shorting blocks on JP5 and JP7 are normally placed in the Master position for the Uno32 to function as an SPI master. Additionally, jumper JP4 is used to select PWM output or the SPI SS function on pin 10. The jumper on JP4 should be in the RD4 position to select PWM output. It should be in the RG9 position to select the SPI SS function. This uses SPI2 (SS2, SDI2, SDO2, SCK2) on the PIC32 microcontroller.

I²C: Synchronous serial interface. The PIC32 microcontroller shares analog pins A4 and A5 with the two I²C signals SDA and SCL. Jumpers JP6 and JP8 are used to select whether the analog pin functions or the I²C pin functions are being used. The shorting blocks are placed in the A4/A5 position to select the analog input function or general digital I/O. They are placed in the RG3/RG2 position to use the pins for I²C operation. This uses I2C1 (SDA1, SCL1) on the PIC32 microcontroller.

Note: The I2C bus uses open collector drivers to allow multiple devices to drive the bus signals. This means that pull-up resistors must be provided to supply the logic high state for the signals. These pull-up resistors are not on the Uno32 board and must be provided externally. The resistance of the pull-up resistor to use depends on the total number of devices on the bus, the length of wire, and the clock speed being used. It essentially depends on distributed capacitance on the bus. The higher the distributed capacitance and the faster the clock speed, the smaller the

resistance should be. Values typically used are in the range of 2K to 10K ohms.

PWM: Pulse width modulated output. Pins 3 (OC1), 5 (OC2), 6 (OC3), 9 (OC4), and 10 (OC5).

External Interrupts: Pin 38 (INT0), Pin 2 (INT1), Pin 7 (INT2), Pin 8 (INT3), Pin 35 (INT4)

User LEDs: Pin 13 (LD4), Pin 43 (LD5). Pin 13 is shared between a connector pin and the LED. Pin 43 only goes to the LED and not any connector pin. Driving the pin high turns the LED on, driving it low turns it off.

A/D Converter Reference: Labeled A, the left-most outer pin on connector J5. This is used to provide an external voltage reference to determine the input voltage range of the analog pins. The maximum voltage that can be applied to this pin is 3.3V. This pin can also be used as digital pin 42.

RTCC: Real Time Clock Calendar. The PIC32 microcontroller contains an RTCC circuit that can be used to maintain time and date information. The operation of the RTCC requires a 32.768Khz frequency source. Crystal X2 (not loaded), just above and to the right of the PIC32 microcontroller IC is provided for the user to solder in a 32Khz watch crystal. The Citizen CFS206-32.768KDZF-UB is a crystal part that can be used in this location.

RESET: A reset button is at the upper left corner of the board. Pressing this button will reset the PIC32 microcontroller.

Microchip Development Tool Compatibility

In addition to being used with the MPIDE, the Uno32 board can be used as a more traditional microcontroller development board using Microchip Development Tools.

Unloaded connector JP3 on the left side of the board is used to connect to a Microchip development tool, such as the PICkitTM3. The holes for JP3 are staggered so that a standard, 100mil spaced, 6-pin header can be press fit to the board without the need to solder it in place. Any Microchip development tool that supports the PIC32 microcontroller family, and can be connected via the same 6-pin interface as the PICkit3 can be used.

Typically, a right angle male connector will be used in JP3 so that a PICkit3 can be attached coplanar with the Uno32 board. If the connector is loaded from the top, the PICkit3 will be upright (button and LEDs visible). Alternatively, the connector can be loaded from the bottom. In this case, the PICkit3 will be upside down.

If JP3 is loaded from the top, the PICkit3 will interfere with the USB connector and the external power connector. A short six-wire cable can be used between the PICkit3 and the Uno32. If JP3 is loaded from the bottom, the PICkit3 won't interfere with the USB and external power connectors.

Diligent has a kit available (PICkit3 Programming Cable Kit) that includes all necessary connectors and cable for connecting a PICkit3 to the Uno32.

The Microchip MPLAB[®] IDE or the MPLAB[®] X IDE can be used to program and debug code running on the Uno32 board. These programs can be downloaded from the Microchip web site.

Using the Microchip development tools to program the Uno32 board will cause the boot loader to be erased. To use the board with the MPIDE again, it is necessary to program the boot loader back onto the board. The boot loader source code and compiled image can be found in the MPIDE software download.

Pinout Table by Logical Pin Number

chipKIT Pin #	Connector Pin #	PIC32 Pin #	PIC32 Signal	Notes
0	J6-01	34	U1RX/SDI1/RF2	
1	J6-03	33	U1TX/SDO1/RF3	
2	J6-05	42	IC1/RTCC/INT1/RD8	
3	J6-07	46	OC1/RD0	
4	J6-09	59	RF1	
5	J6-11	49	OC2/RD1	
6	J6-13	50	OC3/RD2	
7	J6-15	43	IC2/U1CTS/INT2/RD9	
8	J5-01	44	IC3/PMCS2/PMA15/INT3/RD10	
9	J5-03	51	OC4/RD3	
10	J5-05	52 or 8	(PMWR/OC5/IC5/CN13/RD4) or (SS2/PMA2/CN11/RG9)	selected by JP4, also on J8-6
11	J5-07	6 or 5	(SDO2/PMA3/CN10/RG8) or (SDI2/PMA5/CN8/RG7)	selected by JP5, also on J8-1
12	J5-09	5 or 6	(SDI2/PMA5/CN8/RG7) or (SDO2/PMA3/CN10/RG8)	selected by JP7, also on J8-4
13	J5-11	4	SCK2/PMA5/CN8/RG6	also on J8-3, User LED LD4r
14/A0	J7-01	14	C2IN-/AN2/SS1/CN4/RB2	
15/A1	J7-03	12	C1IN-/AN4/CN6/RB4	
16/A2	J7-05	21	U2CTS/C1OUT/AN8/RB8	
17/A3	J7-07	23	TMS/CVREFOUT/PMA13/AN10/RB10	
18/A4	J7-09	27 or 36	(TCK/PMA11/AN12/RB12) or (SDA1/RG3)	selected by JP6
19/A5	J7-11	29 or 37	(PMALH/PMA1/U2RTS/AN14/RB14) or (SCL1/RG2)	selected by JP8
20/A6	J7-02	13	C2IN+/AN3/CN5/RB3	
21/A7	J7-03	11	C1IN+/AN5/CN7/RB5	
22/A8	J7-06	22	PMA7/C2OUT/AN9/RB9	
23/A9	J7-08	24	TDO/PMA12/AN11/RB11	
24/A10	J7-10	28	TDI/PMA10/AN13/RB13	
25/A11	J7-12	30	PMALL/PMA0/AN15/OCFB/CN12/RB15	
26	J6-02	60	PMD0/RE0	
27	J6-04	61	PMD1/RE1	
28	J6-06	62	PMD2/RE2	
29	J6-08	63	PMD3/RE3	
30	J6-10	64	PMD4/RE4	
31	J6-12	1	PMD5/RE5	
32	J6-14	2	PMD6/RE6	
33	J6-16	3	PMD7/RE7	
34	J5-02	53	PMRD/CN14/RD5	
35	J5-04	45	IC4/PMCS1/PMA14/INT4/RD11	
36	J5-06	54	CN15/RD6	
37	J5-08	55	CN16/RD7	

38	J5-10	35	U1RTS/BCLK1/SCK1/INT0/RF6	
39	J5-12	31	PMA9/U2RX/SDA2/CN17/RF4	
40	J5-14	32	PMA8/U2TX/SCL2/CN18/RF5	
41	J5-16	15	PGC1/AN1/VREF-/CVREF-/CN3/RB1	
42	J5-15	16	PGED1/PMA6/AN0/VREF+/CVREF+/CN2/RB0	
43		58	RF0	User LED LD5

Pinout Table By Shield Connector Pin

Connector Pin #	chipKIT Pin #	PIC32 Pin #	PIC32 Signal	Notes
J5-01	8	44	IC3/PMCS2/PMA15/INT3/RD10	
J5-02	34	53	PMRD/CN14/RD5	
J5-03	9	51	OC4/RD3	
J5-04	35	45	IC4/PMCS1/PMA14/INT4/RD11	
J5-05	10	52 or 8	(PMWR/OC5/IC5/CN13/RD4) or (SS2/PMA2/CN11/RG9)	selected by JP4, also on J8-6
J5-06	36	54	CN15/RD6	
J5-07	11	6 or 5	(SDO2/PMA3/CN10/RG8) or (SDI2/PMA5/CN8/RG7)	selected by JP5, also on J8-1
J5-08	37	55	CN16/RD7	
J5-09	12	5 or 6	(SDI2/PMA5/CN8/RG7) or (SDO2/PMA3/CN10/RG8)	selected by JP7, also on J8-4
J5-10	38	35	U1RTS/BCLK1/SCK1/INT0/RF6	
J5-11	13	4	SCK2/PMA5/CN8/RG6	also on J8-3, user LED LD4
J5-12	39	31	PMA9/U2RX/SDA2/CN17/RF4	
J5-13			GND	
J5-14	40	32	PMA8/U2TX/SCL2/CN18/RF5	
J5-15	42	16	PGED1/PMA6/AN0/VREF+/CVREF+/CN2/RB0	
J5-16	41	15	PGC1/AN1/VREF-/CVREF-/CN3/RB1	
J6-01	0	34	U1RX/SDI1/RF2	
J6-02	26	60	PMD0/RE0	
J6-03	1	33	U1TX/SDO1/RF3	
J6-04	27	61	PMD1/RE1	
J6-05	2	42	IC1/RTCC/INT1/RD8	
J6-06	28	62	PMD2/RE2	
J6-07	3	46	OC1/RD0	
J6-08	29	63	PMD3/RE3	
J6-09	4	59	RF1	
J6-10	30	64	PMD4/RE4	
J6-11	5	49	OC2/RD1	
J6-12	31	1	PMD5/RE5	
J6-13	6	50	OC3/RD2	
J6-14	32	2	PMD6/RE6	
J6-15	7	43	IC2/U1CTS/INT2/RD9	
J6-16	33	3	PMD7/RE7	
J7-01	A00/14	14	C2IN-/AN2/SS1/CN4/RB2	
J7-02	A06/20	13	C2IN-/AN3/CN5/RB3	
J7-03	A01/15	12	C1IN-/AN4/CN6/RB4	
J7-03	A07/21	11	C1IN-/AN5/CN7/RB5	
J7-05	A02/16	21	U2CTS/C1OUT/AN8/RB8	
J7-06	A08/22	22	PMA7/C2OUT/AN9/RB9	
J7-07	A03/17	23	TMS/CVREFOUT/PMA13/AN10/RB10	

J7-08	A09/23	24	TDO/PMA12/AN11/RB11	
J7-09	A04/18	27 or 36	(TCK/PMA11/AN12/RB12) or (SDA1/RG3)	selected by JP6
J7-10	A10/24	28	TDI/PMA10/AN13/RB13	
J7-11	A05/19	29 or 37	(PMALH/PMA1/U2RTS/AN14/RB14) or (SCL1/RG2)	selected by JP8
J7-12	A11/25	30	PMALL/PMA0/AN15/OCFB/CN12/RB15	

Pinout Table by PIC32 Microcontroller Pin

PIC32 Pin #	Connector Pin #	chipKIT Pin #	PIC32 Signal	Notes
1	J6-12	31	PMD5/RE5	
2	J6-14	32	PMD6/RE6	
3	J6-16	33	PMD7/RE7	
4	J5-11	13	SCK2/PMA5/CN8/RG6	also on J8-3, User LED LD4
5	J5-09 or J5-07	12	SDI2/PMA5/CN8/RG7	selected by JP7/JP5, also on J8-1
6	J5-07 or J5-09	11	SDO2/PMA3/CN10/RG8	selected by JP5/JP7, also on J8-4
7	JP3-01		MCLR	PIC32 reset, ICSP signal
8	J5-05		SS2/PMA2/CN11/RG9	selected by JP4, also on J8-6
9			VSS	
10			VDD	
11	J7-03	A07/21	C1IN+/AN5/CN7/RB5	
12	J7-03	A01/15	C1IN-/AN4/CN6/RB4	
13	J7-02	A06/20	C2IN+/AN3/CN5/RB3	
14	J7-01	A00/14	C2IN-/AN2/SS1/CN4/RB2	
15	J5-16	41	PGC1/AN1/VREF-/CVREF-/CN3/RB1	
16	J5-15	42	PGED1/PMA6/AN0/VREF+/CVREF+/CN2/RB0	
17	JP3-05		PGEC2/AN8/OCFARB6	ICSP signal
18	JP3-04		PGED2/AN7/RB7	ICSP signal
19			AVDD	
20			AVSS	
21	J7-05	A02/16	U2CTS/C1OUT/AN8/RB8	
22	J7-06	A08/22	PMA7/C2OUT/AN9/RB9	
23	J7-07	A03/17	TMS/CVREFOUT/PMA13/AN10/RB10	
24	J7-08	A09/23	TDO/PMA12/AN11/RB11	
25			VSS	
26			VDD	
27	J7-09	A04/18	TCK/PMA11/AN12/RB12	selected by JP6
28	J7-10	A10/24	TDI/PMA10/AN13/RB13	
29	J7-11	A05/19	PMALH/PMA1/U2RTS/AN14/RB14	selected by JP8
30	J7-12	A11/25	PMALL/PMA0/AN15/OCFB/CN12/RB15	
31	J5-12	39	PMA9/U2RX/SDA2/CN17/RF4	
32	J5-14	40	PMA8/U2TX/SCL2/CN18/RF5	
33	J6-03	1	U1TX/SDO1/RF3	
34	J6-01	0	U1RX/SDI1/RF2	
35	J5-10	38	U1RTS/BCLK1/SCK1/INT0/RF6	
36	J7-09		SDA1/RG3	selected by JP6
37	J7-11		SCL1/RG2	selected by JP8
38			VDD	
39			OSC1/CLKI/RC12	X1, system clock oscillator

40			OSC2/CLKO/RC15	X1, system clock oscillator
41			VSS	
42	J6-05	2	IC1/RTCC/INT1/RD8	
43	J6-15	7	IC2/U1CTS/INT2/RD9	
44	J5-01	8	IC3/PMCS2/PMA15/INT3/RD10	
45	J5-04	35	IC4/PMCS1/PMA14/INT4/RD11	
46	J6-07	3	OC1/RD0	
47			SOSCI/CN1/RC13	X2, secondary oscillator
48			SOSCO/T1CK/CN0/RC14	X2, secondary oscillator
49	J6-11	5	OC2/RD1	
50	J6-13	6	OC3/RD2	
51	J5-03	9	OC4/RD3	
52	J5-05	10	PMWR/OC5/IC5/CN13/RD4	selected by JP4
53	J5-02	34	PMRD/CN14/RD5	
54	J5-06	36	CN15/RD6	
55	J5-08	37	CN16/RD7	
56			VCAP/VDDcore	
57			ENVREG	
58		43	RF0	User LED LD5
59	J6-09	4	RF1	
60	J6-02	26	PMD0/RE0	
61	J6-04	27	PMD1/RE1	
62	J6-06	28	PMD2/RE2	
63	J6-08	29	PMD3/RE3	
64	J6-10	30	PMD4/RE4	

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวีระวัฒน์ พรุ่งเรืองโชค เกิดวันที่ 25 ตุลาคม พ.ศ.2533 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (ชีววิทยา) จากภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556



